Calculation of the Exchange Fund of Electrical Equipment of Industrial Enterprises

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M., Cherepanov V.V., Ozhegov A.N., Zakalata A.A.
Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The purpose of this work is the theoretical substantiation and development of a practical method for calculating the exchange fund of electrical equipment of an industrial enterprise. The purpose is achieved through the use of separate methods of queuing theory if the flow of applications for repairs and restoration are the simplest. It is confirmed by the results of statistical studies. Therefore, for the mathematical description of the repair problem the authors use the scheme $[Mm; Ms; n]$, which corresponds to the process of death and reproduction. As a criterion for optimizing the exchange fund of electrical equipment it is proposed to use the zero probability waiting for the replacement of a faulty electrical component with a working from the exchange fund. For the case of the simplest flow of applications for service, the authors suggest to use the Peck and Hazelwood tables, which significantly simplify the calculation of the exchange fund for known failure rates and electrical equipment recoveries. For practical use of the proposed method, the authors have developed convenient forms for presenting initial data for calculating the exchange fund, and it is proposed to present the results of calculations in the form of several options for the optimal number of electrical equipment in the exchange fund depending on the accepted level of zero expectation probability, the number of elements from the exchange fund and their recovery time. The proposed method will optimize the exchange fund of electrical equipment and reduce the cost of its formation.
***Keywords*:** exchange fund, probability of zero expectation, recovery rate, optimality criterion, system reliability, queueing systems.
DOI: 10.5281/zenodo.2650407

Calculul fondului de schimb al echipamentelor electrice ale întreprinderilor industriale

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M., Cherepanov V.V., Ozhegov A.N., Zakalata A.A.
Universitatea de Stat din Vyatka
Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării constă în fundamentarea teoretică și dezvoltarea unei metode practice de calcul al fondului optim de schimb al echipamentelor electrice ale unei întreprinderi industriale. Datele inițiale pentru constituirea fondului de schimb sunt date statistice privind defecțiunile și recuperările anumitor tipuri de echipamente electrice (timpul mediu de funcționare și timpul mediu de recuperare). Scopul a fost atins pe baza utilizării unor metode ale teoriei serviciului de masă, cu condiția, ca fluxul de aplicații pentru reparații și restaurare să fie cel mai simplu. Această tratare a problemei are la bază ca confirmare rezultater publicate ale numeroaselor studii statistice privind fiabilitatea echipamentelor electrice. Prin urmare, pentru descrierea matematică a problemei de reparare, autorii folosesc o schemă binecunoscută care corespunde procesului de deces și reproducere. Ca un criteriu pentru optimizarea fondului de schimb al echipamentelor electrice, autorii propun să folosească probabilitatea zero de așteptare pentru înlocuirea unui element defectat cu un element robust, care ar trebui să prezent în fondul de schimb. În cazul celui mai simplu flux de aplicații pentru servicii, autorii propun utilizarea tabelelor statistice ale lui Peck și Hazelwood, care pot simplifica în mod semnificativ calcularea fondului de schimb pentru ratele cunoscute ale refuzurilor și restaurare ale componentelor electrice. Pentru utilizarea practică a metodei propuse, autorii au elaborat forme convenabile de prezentare a datelor inițiale pentru calcularea fondului de schimb. Rezultatele calculelor se propun a fi prezentate sub forma mai multor variante ale numărului optim de echipamente electrice în fondul de schimb al întreprinderii.
***Cuvinte-cheie*:** fondul de schimb, probabilitatea zero de așteptare, rata de recuperare, criteriul de optimitate, fiabilitatea sistemului, sistemul de servicii de masă.

© Басманов В.Г., Холманских В.М., Черепанов В.В., Ожегов А.Н., Закалата А.А. 2019

Расчет обменного фонда электрооборудования промышленных предприятий

Басманов В.Г., Холманских В.М., Черепанов В.В., Ожегов А.Н., Закалата А.А.
Вятский государственный университет
г. Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является теоретическое обоснование и разработка практического метода расчета оптимального обменного фонда электрооборудования промышленного предприятия. Исходными данными для формирования обменного фонда являются статистические данных об отказах и восстановлениях конкретных видов электрооборудования (среднее время исправной работы и среднее время восстановления). Поставленная цель была достигнута на основе использования отдельных методов теории массового обслуживания, при условии, что потоки заявок на ремонты и восстановления являются простейшими. Это подтверждается публикациями результатов многочисленных статистических исследований по надежности электрооборудования. Поэтому для математического описания ремонтной проблемы авторами используется хорошо известная схема $[Mm; Ms; n]$, которая отвечает процессу гибели и размножения. В качестве критерия оптимизации обменного фонда элементов электрооборудования, авторами предлагается использовать вероятность нулевого ожидания замены неисправного элемента на исправный, который должен быть в обменном фонде. Для случая простейшего потока заявок на обслуживание авторы предлагают использовать статистические таблицы Пека и Хейзельвуда, которые позволяют существенно упростить расчет обменного фонда по известным интенсивностям отказов и восстановлений элементов электрооборудования. Для практического использования предлагаемого метода авторами разработаны удобные формы представления исходных данных для расчета обменного фонда. Результаты расчетов предлагается представлять в виде нескольких вариантов оптимального количества элементов электрооборудования в обменном фонде предприятия в зависимости от принятого уровня вероятности нулевого ожидания, количества элементов в обменном фонде и времени их восстановления. Предложенная методика позволит оптимизировать обменный фонд восстанавливаемых элементов электрооборудования, что повысит надежность не только электрооборудования промышленного предприятия, но и системы электроснабжения в целом, т.к. большинство элементов системы электроснабжения являются восстанавливаемыми (ремонтируемыми) электротехническими изделиями. Таким образом можно минимизировать затраты на комплектование обменного фонда.

Ключевые слова: обменный фонд, вероятность нулевого ожидания, интенсивность восстановления, критерий оптимальности, надежность системы, системы массового обслуживания.

Введение

Во время отказа восстанавливаемых элементов электрооборудования промышленного предприятия в условиях рыночной экономики, с большой долей вероятности, может возникнуть нежелательная ситуация: на складе нет в наличии нового элемента, а в ремонтном цехе отсутствует восстановленный элемент, что недопустимо для предприятий с непрерывными технологическими процессами. Подобная ситуация может возникнуть и в системе электроснабжения предприятия при этом могут наблюдаться перебои в электроснабжении на время ожидания замены или срочного ремонта вышедшего из строя элемента системы электроснабжения (далее элемента), восстановление которого происходит в экстремальных условиях, нарушается технология ремонта, что может привести к резкому снижению послеремонтной надежности элемента.

В конечном итоге это может вызвать нарушение технологии производства и снижение показателей надежности системы электроснабжения промышленного предприятия.

Разумеется, на каждом предприятии предусмотрено резервирование электроснабжения, но и в этом случае может возникнуть критическая ситуация, когда недостаточно мощности резервных линий, т.е. на время восстановления отказавшего элемента неизбежно отключение наименее ответственных потребителей электрической энергии.

Для устранения указанной выше критической ситуации, очевидно, надо создать неснижаемый оптимальный обменный фонд восстанавливаемых элементов системы электроснабжения. Это позволит обеспечить качественный технологический процесс, до минимума сократить перебои в электроснабжении, улучшить качество ремонта элементов и в итоге повысить надежность производства и электроснабжения промышленного предприятия.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка практического метода расчета обменного фонда электрооборудования промышленного предприятия с использованием данных об отказах конкрет-

ных видов электрооборудования (среднее время исправной работы и среднее время восстановления (ремонта)).

Выполним начальный анализ формирования обменного фонда. Поступающие в ремонтный цех неисправные элементы будут обмениваться тем быстрее, чем больше будет их количество в обменном фонде, но с увеличением последнего возрастают финансовые затраты на его формирование. Минимум затрат на комплектование обменного фонда будет тогда, когда он содержит оптимальное количество элементов. Поэтому возникает задача по расчету оптимального обменного фонда.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Моменты возникновения отказа элемента, поступления его в ремонтный цех и продолжительность восстановления являются случайными величинами. Поэтому могут возникнуть очереди восстанавливаемых элементов, ожидающих ремонта и обмена. Предполагая, что демонтированные из эксплуатации неисправные элементы немедленно транспортируются в ремонтный цех, можно утверждать, что поток заявок на ремонт будет практически повторять поток их отказов. В [1] показано, что поток отказов крановых электродвигателей является простейшим. В многочисленной литературе по надежности электрооборудования, например, [2-6], подтверждается, что практически все виды электротехнического оборудования в период нормальной эксплуатации отвечают основному закону надежности – экспоненциальному. Если число элементов в обменном фонде равно числу отказавших элементов, поступающих из эксплуатации, то наблюдается установившийся режим (бесперебойная замена неисправных элементов на восстановленные, имеющиеся в обменном фонде). Если же равенство нарушено, то в фонде может не оказаться элементов, которыми можно было бы заменить отказавшие элементы. Образуется очередь на замену, время ожидания в очереди зависит от количества элементов в обменном фонде и времени восстановления, которое по данным статистических исследований согласуется с экспоненциальным законом распределения.

Оптимальное количество обменных элементов определяется на основе теоретических методов в многочисленных работах по теории массового обслуживания [7-17]. Используем разработанный в общем виде математический аппарат [18] для анализа различных систем массового обслуживания. Для этого представим процесс эксплуатации элементов в виде замкнутой системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием (рис. 1).

Так как поступающий поток неисправных элементов является пуассоновским, а промежутки времени, в течение которых элементы восстанавливаются, распределены по показательному закону, то состояние системы будет полностью определено числом n неисправных элементов, требующих замены в момент времени t на исправные, находящиеся в обменном фонде. Предсказание будущего течения процесса не будет зависеть от прошлого состояния. Таким образом, рассматриваемый процесс является марковским, который полностью определяется матрицей А переходных вероятностей и совокупностью начальных вероятностей состояний $p_n(0)$.

В литературе [19, 20] описанный выше процесс относится к проблеме ремонта, которая связана с теорией очередей. Более подробное рассмотрение вопроса излагается в [21-29].

Для математического изложения процесса эксплуатации электрооборудования воспользуемся работой [30].

Пусть имеется m взаимно независимых элементов, для которых создана общая группа в n запасных элементов. Пусть каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени работы до отказа (символ M) с постоянной интенсивностью отказов λ' для каждого элемента. Далее, пусть для восстановления работоспособности имеется s ремонтирующих органов, т.е. одновременно может ремонтироваться до s отказавших единиц. Для СМО с ожиданием должно выполняется условие - если все ремонтные органы заняты, то вновь отказавший элемент становится последним в общую очередь. Будем считать, что длительности ремонта – случайные независимые величины, имеющие экспоненциальное распределение времени ремонта с постоянной интенсивностью восстановления μ для каждого отказавшего элемента и результирующей интенсивностью восстановления μ/s.

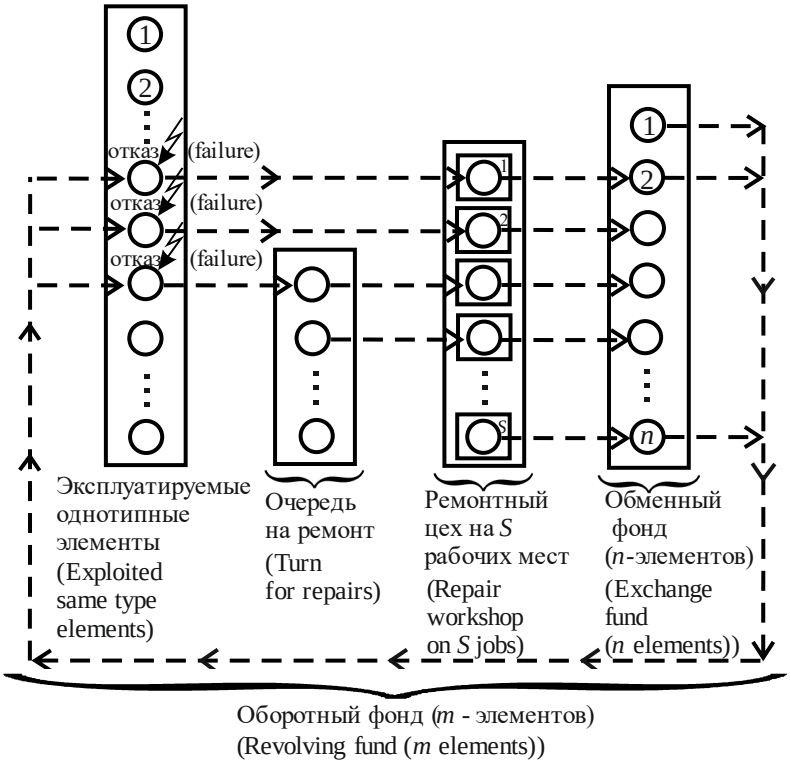


Рис. 1. Представление процесса эксплуатации восстанавливаемого электрооборудования в виде замкнутой СМО с ожиданием. [1]

Основной целью изучения данного процесса является решение вопроса - как можно достичь определенной надежности системы, варьируя количество резервных элементов n?

Схема, иллюстрирующая данную ремонтную проблему, классифицируется как $[\mathrm{Mm;\ Ms;\ n}]$ и представлена на рис. 2.

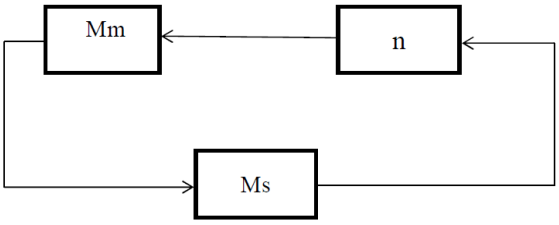


Рис. 2. Схема $[\mathrm{Mm;\ Ms;\ n}]$, иллюстрирующая ремонтную проблему. [2]

Схема типа $[\mathrm{Mm;\ Ms;\ n}]$, описывается при помощи процесса гибели и размножения. В работе [31] приводится подробное исследование этого класса случайных процессов.

Состояние системы во времени характеризуется количеством элементов, которые ремонтируются и стоят в очереди на ремонт. Состояния - 1 и $K=m+n+1$ являются отражающими. Процесс гибели и размножения есть стационарный марковский процесс $X(t)$, пространство состояний которого есть неотрицательные числа. Матрица переходных вероятностей этого процесса показывает все возможные состояния обменного фонда в интервале времени $(t, t+\Delta t)$, т.е. какие могут произойти возможные переходы состояний с соответствующими вероятностями. В [19] приведено в общем виде математическое описание процесса гибели и размножения и показано, что матрица переходных вероятностей удовлетворяет дифференциальным уравнениям $P'(t)=AP(T)$ и $P'(t)=P(T)A$ с начальными условиями $P(0)=1$, где А есть матрица Якоби.

Получим матрицу А, построим граф перехода вероятностей и составим систему дифференциальных уравнений для нашего случая.

Обозначим через $Y_0, Y_1, ..., Y_{\mathrm{m}}$ все возможные состояния обменного фонда. Тогда в интервале времени $(t, t+\Delta t)$ могут произойти следующие возможные переходы состояния с соответствующими вероятностями, которые приведены в табл. 1.

где λ' – интенсивность отказа отдельного элемента;

n – количество элементов в обменном фонде;

[1,2] Appendix 1

m – количество элементов в оборотном фонде;

μ – интенсивность восстановления поврежденных элементов.

Следует отметить, что практический интерес представляется случай, когда $m > n$.

Принимая во внимание перечисленные выше возможные состояния и вероятности перехода в эти состояния, построим граф возможных состояний (рис. 3) и выведем матрицу переходных вероятностей A (рис. 4).

Таблица 1[3].

Возможные переходы состояния обменного фонда с соответствующими вероятностями[4].

Переходы состояния (State transitions)		Вероятность переходов (Transition probability)
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_0 \to Y_0$	$1 - m\lambda' dt$
Использован один элемент из обменного фонда (Used one item from the exchange fund)	$Y_0 \to Y_1$	$m\lambda' dt$
Обменный фонд достиг вновь n элементов (Exchange fund reached again n items)	$Y_1 \to Y_0$	$\mu/n\,dt$
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_1 \to Y_1$	$1-(m-1)\lambda' dt - \mu/n\,dt$
Использовано два элемента из обменного фонда (Used two items from the exchange fund)	$Y_1 \to Y_2$	$(m-1)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items)	$Y_2 \to Y_1$	$2\mu/n\,dt$
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_2 \to Y_2$	$1-(m-2)\lambda' dt - 2\mu/n\,dt$
……	……	……
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_{n-1} \to Y_{n-1}$	$1-(m-n+1)\lambda' dt - (n-1)/n\,\mu dt$
Использованы все n элементов обменного фонда (Used all n elements of the exchange fund)	$Y_{n-1} \to Y_n$	$(m-n+1)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items)	$Y_n \to Y_{n-1}$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_n \to Y_n$	$1-(m-n)\lambda' dt - \mu dt$
Использованы все n элементов обменного фонда и один ожидает обмена (All n elements of the exchange fund are used and one is waiting for the exchange.)	$Y_n \to Y_{n+1}$	$(m-n)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items)	$Y_{n+1} \to Y_n$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_{n+1} \to Y_{n+1}$	$1-(m-n-1)\lambda' dt - \mu dt$
……	……	……
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_{m-1} \to Y_{m-1}$	$1-\lambda' dt - \mu dt$
Использованы все элементы обменного фонда и один ожидает замены (All elements of the exchange fund are used and one is waiting for replacement.)	$Y_{m-1} \to Y_m$	$\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items)	$Y_m \to Y_{m-1}$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state)	$Y_m \to Y_m$	$1-\mu dt$

[3,4] Appendix 1

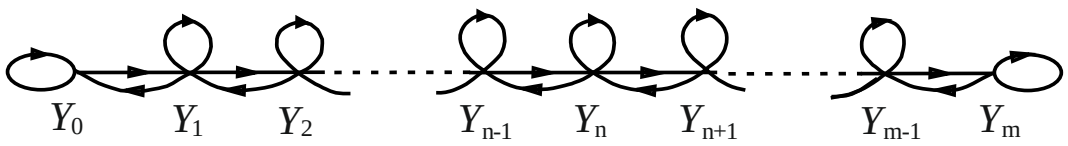


Рис. 3. Граф перехода возможных состояний обменного фонда элементов электроснабжения промышленного предприятия. [5]

Состояние обменного фонда электроцеха в момент *t+dt*
(Condition of an exchange fund of electrical workshop at the time of *t +dt*)

Состояние обменного фонда электроцеха в момент *t*
(Condition of an exchange fund of electrical workshop at the time of *t*)

A =

	Y_0	Y_1	Y_2		Y_{n-1}	Y_n	Y_{n+1}		Y_{m-1}	Y_m
Y_0	$1-m\lambda' dt$	$m\lambda' dt$	0	…	0	0	0	…	0	0
Y_1	$\mu/n\,dt$	$1-(m-1)\lambda' dt-$ $-\mu/n\,dt$	$(m-1)\lambda' dt$	…	0	0	0	…	0	0
Y_2	0	$2\mu/n\,dt$	$1-(m-2)\lambda' dt-$ $-2\mu/n\,dt$	…	0	0	0	…	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮
Y_{n-1}	0	0	0	…	$1-(m-n+1)$ $\lambda' dt-(n-1)/n$ μdt	$(m-n+1)$ $\lambda' dt$	0	…	0	0
Y_n	0	0	0	…	μdt	$1-(m-n)$ $\lambda' dt-\mu dt$	$(m-n)\lambda' dt$	…	0	0
Y_{n+1}	0	0	0	…	0	μdt	$1-(m-n-1)$ $\lambda' dt-\mu dt$	…	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮
Y_{m-1}	0	0	0	…	0	0	0	…	$1-\lambda' dt-$ $-\mu dt$	$\lambda' dt$
Y_m	0	0	0	…	0	0	0	…	μdt	$1-\mu dt$

Рис. 4. Матрица переходов состояния обменного фонда элементов электрооборудования. [6]

Вероятность различных состояний рассматриваемой системы описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&p_0(t) = -m\lambda' p_0(t) + \frac{\mu}{n} p_1(t);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&p'_k(t) = -\left[(m-k)\lambda' + k\frac{\mu}{n}\right] p_k(t) + (m-k+1)\lambda' p_{k-1}(t) + (k+1)\frac{\mu}{n} p_{k+1}(t), \text{ при } (1 \le k < n);\\
&p'_k(t) = -\left[(m-k)\lambda' + \mu\right] p_k(t) + (m-k+1)\lambda' p_{k-1}(t) + \mu p_{k+1}(t), \text{ при } (n \le k < m);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&p'_m(t) = -\mu p_m(t) + \lambda' p_{m-1}(t), \text{ при } (k = m).
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $p_0(t); p_1(t); \dots; p_m(t)$ – вероятности возможных состояний системы.

Матрица А (рис. 4) является конечной неприводимой и непериодической, это означает, что при любых значениях λ' и μ всегда существует установившийся режим со следующими уравнениями состояния:

[5,6] Appendix 1

$$\left.\begin{array}{l} m\lambda' p_0 = \dfrac{\mu}{n} p_1; \\ \dots\dots\dots\dots \\ \left[(m-k)\lambda' + k\dfrac{\mu}{n}\right] p_k = (m-k+1)\lambda' p_{k-1} + (k+1)\dfrac{\mu}{n} p_{k+1}, \text{ при } (1 \le k < n); \\ \left[(m-k)\lambda' + \mu\right] p_k = (m-k+1)\lambda' p_{k-1} + \mu p_{k+1}, \text{ при } (n \le k < m); \\ \dots\dots\dots\dots \\ \mu p_m = \lambda' p_{m-1}, \text{ при } (k = n). \end{array}\right\} \quad (2)$$

Используя метод решения системы уравнений (2), изложенный в работе [18], выразим в конечном виде вероятности системы:

$$p_k = \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k p_0, \text{ при } 0 < k \le n; \quad (3)$$

$$p_k = \frac{m!}{k!(m-k)!} \alpha^k p_0, \text{ при } n < k \le m,$$

где

$$p_0 = 1/\left(\sum_{k=0}^{n-1} \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k p_0 + \sum_{k=n}^{m} \frac{m!}{k!(m-k)!} \frac{k!n^n}{n!} \alpha^k\right). \quad (4)$$

Здесь $\alpha = \lambda'/\mu$ – коэффициент использования обменного фонда элементов одного назначения.

Уравнение расхода рассматриваемой системы массового обслуживания запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{\alpha_1(m-k)} = \frac{\overline{\omega}}{\nu} = \frac{n}{\mu(n-\delta)} = \frac{\tau}{k}, \quad (5)$$

где $\overline{\omega}$ – среднее время ожидания обмена;

ν – среднее число оборотных элементов, ожидающих обмена;

δ – среднее число использованных обменных элементов;

τ – среднее время нахождения элемента в системе (ожидание + ремонт).

Для определения оптимального количества элементов в обменном фонде в качестве основного критерия примем вероятность нулевого ожидания $P(\omega = 0)$ обмена неисправного элемента на исправный, который находится в обменном фонде:

$$P(\omega = 0) = \sum_{k=0}^{n-1} p_k = p_0 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k. \quad (6)$$

Определение n из (6) связано с большими вычислениями. Для облегчения расчетов воспользуемся таблицами Пека и Хейзельвуда [32], из которых можно определить оптимальное количество элементов n обменного фонда в зависимости от количества элементов m оборотного фонда, коэффициента обслуживания χ и принятого уровня вероятности нулевого ожидания $P(\omega = 0)$.

Коэффициент χ вычисляется по формуле:

$$\chi = \frac{\alpha}{1+\alpha} = \frac{T_R}{T_R + T_{co}}, \quad (7)$$

где T_R – суммарное время, необходимое на восстановление поврежденного элемента;

T_{co} – наработка элемента между капитальными ремонтами.

По таблицам [32] предоставляется возможность уточнить значение $P(\omega = 0)$ и дополнительно определить коэффициент эффективности системы F, характеризующий величину уменьшения среднего количества оборотных элементов из-за возможного ожидания обмена:

$$F = \frac{T_R + T_{co}}{T_R + T_{co} + \overline{\omega}}. \quad (8)$$

Зная F можно определить среднее количество элементов M, ожидающих обмена:

$$M = m(1 - F). \quad (9)$$

Покажем, как практически можно воспользоваться материалами данной работы.

Суммарное время восстановления отказавших элементов в условиях промышленного предприятия выражается формулой:

$$T_R = t_1 + t_2 + t_3, \qquad (10)$$

где t_1 –время на демонтаж и транспортировку отказавшего элемента в ремонтный цех;

t_2 – время на ожидание восстановления;

t_3 – время на восстановление.

Очевидно, каждая из составляющих суммарного времени восстановления для отдельных элементов и предприятий индивидуальны и зависят от многочисленных факторов, основными из которых являются: общее число элементов всех типов и марок в оборотном фонде предприятия, их эксплуатационная надежность, квалификация и количество специалистов, занятых ремонтом, уровень технической оснащенности ремонтного цеха. Изучение практики выполнения ремонтных работ основных элементов электрооборудования показывает, что $t_1 = 1-5$ часов, t_2 изменяется в широком диапазоне от 1 до 15 рабочих дней.

Время t_3 необходимое для выполнения качественного ремонта элементов в основном определяется соблюдением технологии ремонта, например, для электродвигателей и обмоток коммутационных аппаратов продолжительность пропитки и сушки изоляции составляет 2 –5 рабочих дня.

Учитывая указанные выше обстоятельства предлагается рассчитывать несколько вариантов оптимального количества отдельных элементов в обменном фонде ремонтного цеха, например, для $T_R = 5$, 10 и 15 дней.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Покажем примеры представления исходных данные для расчета обменного фонда и результатов расчета в табличной форме, см. табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2[7]

Пример представления исходных данных для расчета обменного фонда электрооборудования[8].

Тип эл. двигателя (Type of electric motor)	Наименование механизма (The name of the mechanism)	Наработка между отказами, требующими капитального ремонта T_{co}, час (Time between failures requiring major repairs T_{co}, hour)	Время ремонта одного эл. двигат. T_R, дней (Repair time of one electric motor T_R, days)			Принятый уровень вероятности нулевого ожидания, P (Zero wait probability level accepted, P)	Кол-во эл. двигат. в оборотном фонде предприятия m, шт. The number of electric motors in the revolving fund of an enterprise m, pcs.
			15	10	5		
			Коэффициент обслуживания (Service ratio), $\chi = \frac{T_R}{T_R + T_{co}}$				
МТО-12-6	передвижения кабины крана (crane cabin movements)	2695	0.135	0.094	0.049	≥ 0.9	$1, 2, 3, ..., m$
МТ-22-6	передвижения крана (crane movement)	4581	0.084	0.058	0.030		
МТ-42-8	грузовая лебедка крана (crane cargo winch)	12658	0.032	0.022	0.011		

[7,8]Appendix 1

Таблица 3[9].

Пример представления результатов расчета оптимального количества электродвигателей в обменном фонде ремонтного цеха при наличии в оборотном фонде предприятия от 4 до 28 электродвигателей[10].

№ эл. дв. (electric motor number)	Количество электродвигателей в оборотном фонде предприятия (The number of electric motors in the revolving fund of an enterprise)										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28
$T_R = 15$ дней (Days)											
1	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7
2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5
3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3
$T_R = 10$ дней (Days)											
1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6
2	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
$T_R = 5$ дней (Days)											
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Таким образом, для формирования обменного фонда необходимо наличие статистических данных об отказах и восстановлениях интересующего нас электрооборудования. В случае отсутствия данных о наработках между отказами их можно ориентировочно оценить методом экспертных оценок. Время восстановления индивидуально для ремонтных подразделений предприятий и может быть объективно задано и проконтролировано администрацией ремонтного цеха.

В результате проведенных исследований авторами была достигнута цель работы, результатом, которого является создание простого практического метода расчета оптимального обменного фонда электрооборудования. Применение, которого позволит обеспечить надежность системы электроснабжения, состоящей из ремонтируемого электрооборудования, варьируя количество обменных элементов электрооборудования. Кроме того, в процессе проведения исследований были получены и другие результаты, которые можно представить в виде следующих рекомендации при решении подобных задач:

1. Так как процесс эксплуатации восстанавливаемого электрооборудования является марковским, то это позволяет упростить процесс описания всех возможных состояний обменного фонда в интервале времени $(t, t+\Delta t)$ с помощью матрицы Якоби;

2. Для расчета обменного фонда достаточно рассмотреть установившийся процесс функционирования рассматриваемой системы, т.к. на практике почти всегда рассматривается случай, когда период приработки электрооборудования закончился и начался период нормальной (установившейся) эксплуатации электрооборудования, который всегда поддерживается системой ППР и оптимальным обменным фондом электрооборудования;

3. Практический интерес представляет случай, когда количество обменных элементов n меньше количества оборотных элементов m электрооборудования, т.к. в этом случае количество эксплуатируемых элементов будет превышать количество элементов, находящихся в обменном фонде, что будет обеспечивать нормальный процесс эксплуатации;

4. В случае отсутствия данных о наработках между отказами рассматриваемого электрооборудования предлагается их оценивать методом экспертных оценок т.к. это единственный оставшийся способ получения информации о надежности электрооборудования.

Результатом нашей работы является простая, конкретная методика расчета оптимального обменного фонда электрооборудования, которая удобна для практического примене-

[9,10]Appendix 1

ния, чем и отличается от других работ, которые в основном ограничиваются только рассмотрением общих теоретических положений рассматриваемой ремонтной проблемы.

IV. ВЫВОДЫ

1. Реальный процесс эксплуатации однотипного электрооборудования можно описать схемой типа $[Mm; Ms; n]$, отвечающей классической схеме гибели и размножений.

2. Расчет оптимального обменного фонда однотипных элементов электрооборудования может быть выполнен по критерию нулевого ожидания замены отказавшего элемента на исправный, имеющийся в обменном фонде.

3. Предложен простой практический способ для расчета вариантов оптимального количества элементов электрооборудования в обменном фонде предприятия в зависимости от количества элементов в оборотном фонде и времени их восстановления.

4. Предложенная методика позволит создать неснижаемый оптимальный обменный фонд восстанавливаемых элементов, что обеспечит качественный технологический процесс, до минимума сократит перебои в электроснабжении, улучшит качество ремонта элементов системы электроснабжения, минимизирует затраты на комплектование обменного фонда, а, следовательно, повысит надежность производства и электроснабжения промышленного предприятия.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

[1]**Fig. 1.** Presentation of the process of operation of the recovered electrical equipment in the form of a closed QS with the expectation.

[2]**Fig. 2.** The scheme [Mm; Ms; n] which illustrates the repair problem.

[3,4]**Table 1.** Possible transitions of the state of the exchange fund with the corresponding probabilities

[5]**Fig. 3.** Transition graph of possible states of the exchange fund of power supply elements of an industrial enterprise.

[6]**Fig. 4.** Matrix of transitions of the state of the exchange fund of electrical equipment elements.

[7,8]**Table 2.** An example of the presentation of the initial data for the calculation of the exchange fund of electrical equipment.

[9,10]**Table 3.** An example of the presentation of the results of calculating the optimal number of electric motors in the exchange fund of a repair workshop with 4 - 28 electric motors in the revolving fund of an enterprise.

Литература (References)

[1] Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Svjaz pokazatelej nadezhnosti jelektrooborudovanija kranov s ih proizvoditelnostju na predprijatijah lesopromyshlennogo kompleksa [Relation of parameters of reliability electrical equipment of cranes with their productivity at the enterprises of timber industry complex]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija-Modern problems of science and education*, 2014, no. 3. (In Russian). Available at: http://www.science-education.ru/117-13244 (accessed 16.01.2019).

[2] Swingler J. (Ed.) Reliability Characterisation of Electrical and Electronic Systems. Woodhead Publishing, 2015. — 274 p.

[3] Khorolsky V.Ya., Taranov M.A. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya* [Reliability of power supply]. Rostov-on-don, Terra Print, 2007. 128 p. (In Russian).

[4] Hooke J.B. *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike* [The theory of reliability in the electricity industry]. Leningrad, Energoatomizdat, 1990. 206 p. (In Russian).

[5] Malafeev S.I. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya* [Reliability of power supply]. 2nd ed. St. Petersburg, Lan', 2018. 368 p. (In Russian).

[6] Rausand M., Houland A. System Reliability Theory, Models, Statistical Methods and Applications. Second edition. John Wiley & Sons Inc. 2004. 636 p.

[7] Khinchin A.Y. Mathematical Methods in the Theory of Queuing. Dover Publications. 2013. 128 p.

[8] Kalashnikov V.V. Mathematical Methods in Queuing Theory. Springer Science+Business Media Dordrecht. 1994. 382 p. doi: 10.1007/978-94-017-2197-4.

[9] Daigle J. Queueing Theory with Applications to Packet Telecommunication. Springer US. 2010. 316 p.

[10] Gross D., Shortle J.F., Thompson J.M., Harris C.M. Fundamentals of Queueing Theory. Fourth Edition. John Wiley & Sons. 2011. 528 p.

[11] Kleinrock L., Gail R. Queueing Systems: Problems and Solutions. Wiley-Interscience. 1996. 240 p.

[12] Emelyanov A.A. Modeli protsessov massovogo obsluzhivaniya [Queuing process models]. *Prikladnaya informatika – Applied Informatics*, 2008, no. 5 (17), pp.92-130. (In Russian).

[13] Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2013. 429 p. (In Russian).

[14] Newell C.F. Applications Of Queueing Theory. Second Edition. Springer Science & Business Media. 2013. 303 p.

[15] Medhi. J. Stochastic Models in Queueing Theory. Elsevier, 2002. 450p.

[16] Kalashnikov V.V. Mathematical methods in queueing theory. *Journal of Applied Mathematics*

and Stochastic Analysis, 1993, vol. 6, pp. 411-411. doi:10.1155/s1048953393000346

[17] Baccelli F., Bremaud P. Elements of Queueing Theory. Elements of Queueing Theory: Palm Martingale Calculus and Stochastic Recurrences 2nd ed. Springer. 2004. 345 p.

[18] Kaufmann A., Cruon R. Les phénomènes d'attente; théorie et applications. Paris, Dunod, 1961. 274 p.

[19] Barlow R.E., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. Philadelphia: SIAM, 1996. 258 p.

[20] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications. vol. 1, 3rd Edition. Wiley, 2005. 528 p.

[21] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications, vol. 2, 2nd Edition. John Wiley & Sons Inc. 1991. 704 p.

[22] Singla N., Garg P.C. Transient and numerical solution of a feedback queueing system with correlated departures. *American Journal of Numerical Analysis*, 2014, vol. 2(1), pp. 20-28.

[23] Claeys D., Steyaert B., Walraevens J., Laevens K., Bruneel H. Analysis of a versatile batch-service queueing model with correlation in the arrival process. *Performance Evaluation*, 2013, vol.70, pp. 300-316.

[24] Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Ismailov B.G. Analysis of Queuing System with Dynamic Priorities. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015. pp. 23-33. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v47. i9.30

[25] Melikov A., Rustamov A., Jafarzade T., Sztrik J. Methods to Analysis of Queueing Models with State-Dependent Jump Priorities. *Ann. Math. Inform.*, 2016, vol. 46, pp.143–163.

[26] Cox D.R., Smith W.L. Queues. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall, 1999. 180p.

[27] Iravani F., Balcioglu B. On priority queues with impatient customers. *Queueing Systems*, 2008, vol. 58, no. 4, pp. 239–260.

[28] Qing H., Chakravarthy S.R., Analytical and simulation modeling of a multi-server queue with Markovian arrivals and priority services. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, vol. 28, pp. 12–26.

[29] Sundarapandian V. Probability, Statistics and Queuing Theory. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009. 820p.

[30] Takacs L., Introduction to the Theory of Queues, Oxford University Press, New York, 1962. 268p.

[31] Barlow R. E., Repairman problems, in: K. J. Arrow, S. Karlin, and H. Scarf (eds.), Studies in Applied Probability and Management Science, Stanford Univ. Press, Stanford CA, 1962, pp. 18–33.

[32] Peck Z. G., Hazelwood R. N. Finite Queuing Tables: Publications in Operations Research, no. 2. Literary Licensing, LLC. 2013. 224 p.

About authors.

Басманов Владислав Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: диагностика электрооборудования, надежность электроснабжения, энергосбережение.
E-mail: basmanov@vyatsu.ru

Холманских Валерий Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: надежность электроснабжения, энергосбережение.
E-mail:
vm_holmanskih@vyatsu.ru

Закалата Александр Алексеевич, доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: энергосбережение.
E-mail: usr00134@vyatsu.ru

Черепанов Вячеслав Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: cherepanov@vyatsu.ru

Ожегов Андрей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: ojegov@vyatsu.ru

Hysteresis and Eddy Currents Effects Simulation in Idling Mode of the Transformer

Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Divchuk T.Ye.
Zaporizhzhia National Technical University
Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. The design parameters errors of the power transformer in idle mode can reach 15-20%. or more, because engineering techniques disregard the all factors. To reduce the error of engineering techniques modifying the circuit-analytical model. However, their field of application is limited. Therefore, the aim of the work is to develop interconnected circuit and field models that ensure high accuracy of idling parameters by allow for the parameters of the external network, transformer design features and nonlinear magnetic properties of electrical steel, asymmetry and non-sinusoidal idling currents. To achieve this aim, an improved approach is proposed. The scientific novelty of this approach provides conjugation of the external network objects, represented by the elements of the circuit model, with the testing transformer. For idle mode, it is represented as a spatial magnetic field model. The reduction of the computational time was performed by doubling cancellation of the volume of 3D three-phase transformer domain and the conformal transition to the 2D geometric domain. Determination of the effective magnetic characteristics of electrical steel according to single-phase idling experiment data, allows taking into account the combined effect of hysteresis and eddy currents, design and technological factors on the specific losses and magnetization power. This ensures high accuracy of the description of the interrelation between magnetic flux density and magnetic field strength, reducing of current error and relative errors in the calculation of idling losses up to 1.41% and 1.2% for the 3D model and up to 5.18% and 3.2% for the 2D model.
***Keywords*:** circuit field model, three phase transformer, idling mode, magnetic field, finite element method, harmonic analysis, non-sinusoidal and asymmetrical currents.
DOI: 10.5281/zenodo.2650413

Simularea regimului de mers în gol al transformatorului, avand in vedere efectele histerezisului si curentii turbionari

Yarymbash D. S, Kotsur M.I ., Yarymbash S. T., Divchuk T .E.
Universitatea Tehnică Națională din Zaporizhya
Zaporizhia, Ucraina

Rezumat. În rejim de mers în gol discrepanțele dintre parametrii de proiectare și datele de încercare ale unui transformator pot ajunge la 15-20% sau mai mult, deoarece tehnicile de inginerie nu iau în considerare pe deplin pe toți factorii de influență. Pentru a reduce erorile tehnicilor calcul ingineriesc se modifică modelele analitice cunoscute de calcul, dar domeniul de aplicare al acestor metode se limitează doar la nomenclatura transformatoarelor existente la moment. Luarea în considerare a influenței factorilor de proiectare asupra parametrilor regimului de mers în gol pentru noi tipuri de transformatoare se poateasigura prin modelarea câmpurilor electromagnetice, care necesită resurse de calcul mari și consum de timp semnificativ. Scopul lucrării constă în dezvoltarea modelelor îmbunătățite de calcul, racordate cu modelele câmpului magnetic spațial care iau în considerare realizarea constructivă structurală a părții active, histerezisul proprietăților magnetice neliniare ale oțelului electric, asimetria și curenții de fază nesinusoidală și asigură o precizie ridicată pentru determinarea parametrilor de mers în gol al transformatorului. Pentru a studiregimul de mers în gol, modelele aplicate au fost racordate co modele 3D și 2D ale câmpului magnetic, realizarea numerică ale cărora s-a executat pentru un transformator trifazat cu puterea 10 kVA și tensiunea de 380 V / 220 V. Urmare a diminuării de două ori a volumului domeniului 3D a transformatorului trifazat și a tranziției conformale la domeniul cu geometrică 2D s-a asigurat o reducere semnificativă a timpului de calcul prin metoda elementului finit. ***Cuvinte-cheie***: model de circuit, model matematic, câmp magnetic, transformator trifazat, mers în gol, metoda elementelor finite, curenți nesinusoidali și asimetrici.
Cuvinte-cheie: model de circuit, model matematic, câmp magnetic, transformator trifazat, mers în gol, metoda elementelor finite, curenți nesinusoidali și asimetrici.

© Yarymbash D.S., Kotsur M.I.,
Yarymbash S.T., Divchuk T.Ye, 2019

Моделирование режима холостого хода трансформатора с учетом эффектов гистерезиса и вихревых токов

Ярымбаш Д.С., Коцур М.И., Ярымбаш С.Т., Дивчук Т.Е.
Запорожский национальный технический университет
Запорожье, Украина

Аннотация. Погрешность проектных параметров режима холостого хода трансформатора может достигать 15-20%, так как инженерные методики не учитывают комплекс факторов в полном объёме. Для снижения погрешности инженерных методик модифицируют схемно-аналитические модели, но область их применения ограничена существующими сериями трансформаторного оборудования. Учет влияния конструктивных факторов на параметры трансформаторов обеспечивается моделированием электромагнитных полей, но при этом не учитывается влияние внешней сети. Поэтому целью работы является разработка взаимосвязанных схемных и полевых моделей, которые обеспечивают высокую точность определения параметров холостого хода за счет учета параметров внешней сети, особенностей конструкции трансформатора и нелинейных магнитных свойств электротехнической стали, несимметрии и несинусоидальности токов холостого хода. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованный подход, научная новизна которого заключается в сопряжении объектов внешней сети, представленных элементами схемной модели, с исследуемым трансформатором, который для режима холостого хода представлен пространственной моделью магнитного поля. Посредством двукратного сокращения объема 3D области трехфазного трансформатора и конформного перехода к 2D геометрической области обеспечивается существенное сокращение времени вычислений методом конечных элементов. Определение эффективных магнитных характеристик электротехнической стали по данным однофазных опытов холостого хода позволяет учитывать совместное влияние гистерезиса и вихревых токов, конструктивных и технологических факторов на удельные потери и мощность намагничивания, обеспечивая высокую точность описания взаимосвязей между индукцией и напряженностью магнитного поля, снижение токовой погрешности и относительных погрешностей расчета потерь холостого хода до 1,41% и 1,2% для 3D модели и до 5,18% и 3,2% для 2D модели трехфазного трансформатора.

***Ключевые слова*:** схемная модель, математическая модель, магнитное поле, трехфазный трансформатор, холостой ход, метод конечных элементов, несинусоидальные и несимметричные токи.

ВВЕДЕНИЕ

Для бесперебойной работы распределительных электрических сетей установленная мощность силовых трансформаторов должна в несколько раз превышать установленные мощности у потребителей. Поэтому на эффективность и технико-экономические показатели при эксплуатации распределительных сетей в значительной степени влияют потери энергии, которые возникают с момента подключения трансформаторов к сети.

В паспортных данных трансформаторов суммарные потери энергии делятся на две составляющие: на потери в режиме холостого хода (ХХ) и потери в режиме короткого замыкания (КЗ). Также на этапе проектирования силовых трансформатора должны быть определены паспортные параметры режимов ХХ и КЗ, которые в большей степени связаны с реактивной мощностью, а именно: ток ХХ и напряжение КЗ.

В отличие от паспортных данных КЗ параметры ХХ не зависят от номинальной нагрузки. В режиме ХХ активная и реактивная составляющие мощности возникают одновременно с подключением трансформатора к электрической сети. Поэтому стоимость потребления электрической энергии из-за компенсации потерь в трансформаторе и перетоков реактивной мощности является весомой составляющей в общих расходах на эксплуатацию трансформаторного оборудования.

В ряде случаев расхождения между проектными параметрами и данными испытаний трансформатора в режиме ХХ могут достигать 15–20% и более [1]. Для уменьшения указанных погрешностей, как правило, модифицируют существующие расчетные методики, применяя многомерные векторы с эмпирическими корректирующими компонентами [2]. Однако область приложения таких модифицированных методик ограничена существующими сериями трансформаторного оборудования. Поэтому действующая теория и практика проектирования не могут обеспечить в полном объеме неотложные задачи по повышению точности расчета проектных параметров для новых типов силовых трансформаторов. Таким образом,

повышение точности проектирования силовых трансформаторов на основе современных методов, организационных подходов и программных средств, следует рассматривать как комплекс актуальных задач в научном и прикладном плане.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для определения параметров и характеристик силовых трансформаторов, как правило, используются схемные модели, основанные на теории электрических и магнитных цепей [3, 4]. Сравнительная простота алгоритмов компьютерной реализации обусловила широкое применение схемных моделей в конструкторских расчетах [5, 6].

Современные инженерные методики расчета параметров ХХ основаны на методе «участков», когда сложную конструкцию магнитной системы разделяют на участки с равномерным распределением магнитной индукции по их длине. В зависимости от активной площади поперечного сечения осуществляют расчет значений индукции магнитного поля при условии неизменности магнитного потока для всех участков [7]. Такой подход к определению потерь ХХ в трехфазных трансформаторах с плоскими магнитными системами стержневого типа позволяет ограничиться участками шихтованных стержней, ярем и углов магнитной системы. Для номинального напряжения и числа витков первичных фазных обмоток определяют значения ЭДС витка, магнитного потока, а затем – магнитных индукций для всех участков магнитной системы [7]. По данным магнитной индукции и характеристикам выбранной проектантом марки электротехнической стали для каждого участка магнитной системы находят удельные потери и удельную мощность намагничивания и их произведения на активные массы стержней, ярем, углов и активные площади стыков (для мощности намагничивания). Для повышения точности проектных данных ХХ общие потери и мощность намагничивания ХХ, которые определяются суммой указанных произведений для каждого участка магнитной системы, умножают на соответствующие компоненты вектора корректирующих коэффициентов. Однако целый ряд предположений и допущений, которые положены в основу схемных моделей, приводят к упрощенному отображению реальных электромагнитных процессов преобразования энергии переменного тока при ее трансформации [8]. Как следствие, пренебрежение анизотропией магнитных свойств, нелинейностью гистерезисных кривых намагничивания для соответствующих марок холоднокатаных электротехнических сталей [9], особенностями многокомпонентной пространственной конструкции активной части трансформаторов, фазными смещениями токов и падений напряжения, неравномерностью мгновенного распределения магнитных потоков, и составляющих векторов магнитной индукции, несинусоидальностью временных изменений фазных токов ХХ [10], может привести к существенным погрешностям расчета [11–13].

Более полный учет влияния конструктивных факторов на параметры ХХ силовых трансформаторов можно обеспечить посредством моделирования магнитного поля трансформатора [14, 15]. Трехмерное моделирование магнитного поля обеспечивает существенное улучшение точности определения параметров силовых трансформаторов. Однако его компьютерная реализация на основе методов конечных элементов в многокомпонентных областях активной части с нелинейными электрофизическими свойствами осложнена большими затратами времени и требованиями к вычислительным ресурсам [16]. В работе [17] предложена трехмерная модель электромагнитных процессов для определения электрических и электроэнергетических параметров электротехнических систем трансформации переменного тока. Однако ее применение ограничено системами с линейными магнитными свойствами материалов. В работах [18, 19] для эффективной численной реализации конечно элементных моделей магнитного поля предлагается применять дифференциацию размеров конечных элементов и аппроксимацию полиномами Лагранжа первого порядка. Использование такого подхода для проектирования силовых трансформаторов осложняется значительной нелинейностью магнитных свойств и разницей геометрических размеров

отдельных элементов [20]. Некоторые авторы упрощают геометрическую модель и применяют модели плоскопараллельного магнитного поля [22], другие – пренебрегают нелинейностью электрофизических свойств [21]. Указанные упрощения и предположения снижают точность результатов моделирования и, в отдельных случаях, могут исказить реальную картину электромагнитных процессов. В работе [21] допускается инвариантность процессов численной реализации нестационарных схемных моделей ХХ и пространственных моделей стационарного магнитного поля трансформатора. Однако в работе [21] не осуществляется верификация и валидация данных для несимметричных фазных токов. Это не позволяет достоверно оценить влияние гистерезиса магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей на точность расчетов режима ХХ и его параметров.

Расчетная модель магнитного поля для силового трансформатора в режиме опытного ХХ должна детально отражать многокомпонентное строение активной части и учитывать нелинейности электрических и магнитных свойств активных материалов. Эффективность численной реализации математической модели магнитного поля должна соответствовать требованиям оптимизации конструктивных параметров. Это обусловливает актуальность разработки усовершенствованных схемных моделей, взаимосвязанных с пространственными моделями магнитного поля, которые учитывают конструктивное устройство активной части трансформатора, гистерезис нелинейных магнитных свойств электротехнической стали магнитной системы, несимметрию несинусоидальных временных изменений фазных токов, чтобы обеспечить высокую вычислительную эффективность и точность определения паспортных параметров ХХ силового трансформатора.

Поэтому целью работы является разработка взаимосвязанных схемных и полевых моделей, которые обеспечивают высокую точность определения параметров холостого хода за счет учета параметров внешней сети, конструктивных особенностей трансформатора и нелинейных магнитных свойств электротехнической стали, несимметрии и несинусоидальности токов холостого хода.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования режима ХХ на примере трехфазного силового трансформатора с воздушным естественным охлаждением мощностью 10 кВА и напряжениями 380В/220 В рассматриваются схемные модели, сопряженные с моделями магнитного поля в 3D и 2D геометрических областях (рис. 1).

В 3D и 2D схемно-геометрических моделях с электрической схемой испытаний в режиме ХХ сопрягаются 3D и 2D геометрические области активной части трехфазного силового трансформатора (рис. 1). Фазные обмотки опытного трехфазного трансформатора «W_A», «W_B», «W_C» соединяются в "Y" и подключаются через переходные сопротивления «Z_A», «Z_B», «Z_C» к испытательному трансформатору со схемой обмоток "Y/D".

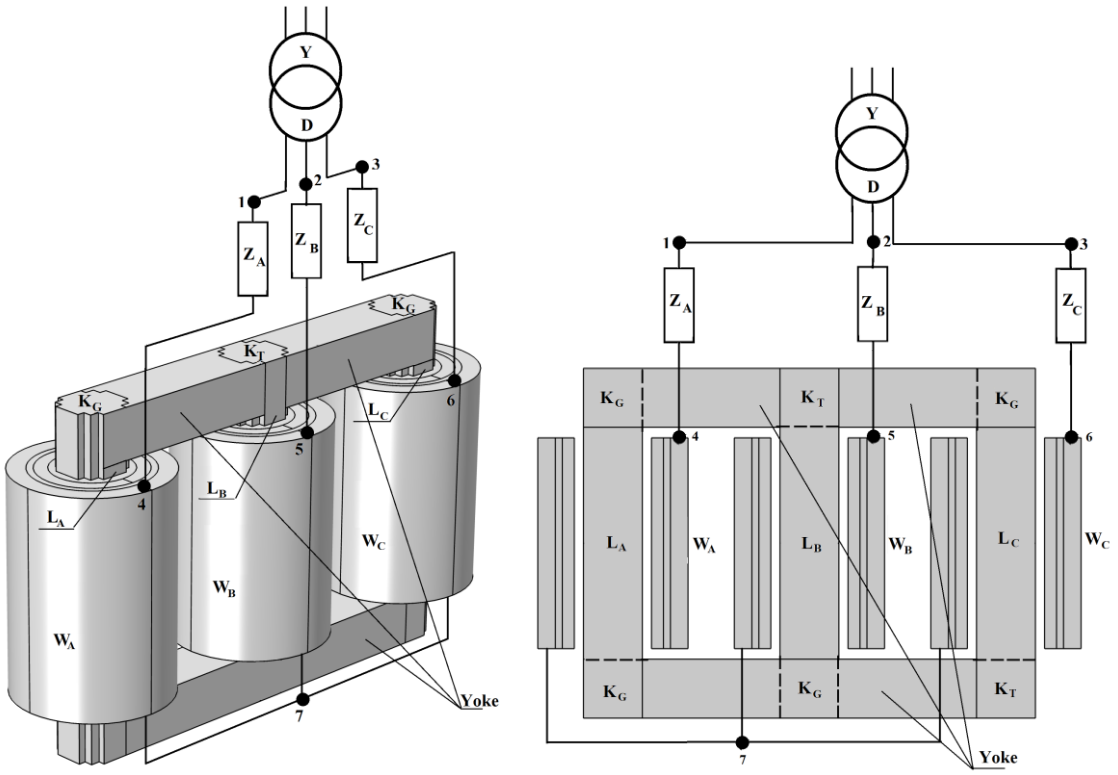
Выходные линейные напряжения опытного трехфазного трансформатора на стороне "D" вторичных обмоток считаются симметричными и синусоидальными [23]:

$$\begin{cases} U_{AB}=U_{AB(max)}\times sin(\omega\tau+\alpha_{AB}), \\ U_{BC}=U_{BC(max)}\times sin(\omega\tau+\alpha_{BC}), \\ U_{CA}=U_{CA(max)}\times sin(\omega\tau+\alpha_{CA}), \end{cases} \quad (1)$$

а переходные сопротивления принимаются одинаковыми и значительно меньшими, чем сопротивления ХХ опытного трансформатора « Z_{Id} »:

$$|Z_A|=|Z_B|=|Z_C|<<|Z_{Id}|$$

В 3D и 2D геометрические модели активной части (рис. 1а, б) входит область с фазными обмотками «W_A», «W_B», «W_C», шихтованная магнитная система с подобластями стержней ступенчатой формы – «L_A», «L_B», «L_C», прямоугольных ярм «Yoke», Т-образных «K_T» и Г-образных «K_G» углов с прямыми стыками.



а) б)

Рис. 1. 3D (а) и 2D (б) схемно-геометрические модели трехфазного силового трансформатора в опытном режиме ХХ [1].

Предположение об отсутствии токов смещения и свободных зарядов позволяет отобразить математическую модель магнитного поля силового трансформатора системой нелинейных уравнений вида [20]:

$$\begin{cases} \sigma(\theta)\left(\partial \mathbf{A}/\partial\tau + grad(\mathbf{U})\right) + \\ + rot\left[\left(\mu_0\mu(\mathbf{H})\right)^{-1} rot(\mathbf{A})\right] = \mathbf{J_e}\big|_j; \\ \mathbf{B}(|\mathbf{H}|) = \mu_0\mu(|\mathbf{H}|)\cdot\mathbf{H};\ j \in \{W_A, W_B, W_C, \\ L_A, L_B, L_C, K_{G1}, K_{G2}, K_{T1}, \ldots, K_{T4}\}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{B}(|\mathbf{H}|)$ – гистерезисная характеристика намагничивания; **B**, **H** – индукция и напряженность магнитного поля; μ, μ_0 – относительная магнитная проницаемость и магнитная проницаемость вакуума; **U**, **A** – электрический и векторный магнитный потенциалы; $\mathbf{J_e}$ – плотность стороннего тока; θ – температура; σ – удельная электропроводность.

Для выбранного трансформатора в интервале изменения испытательных напряжений однофазных опытов ХХ ($0{,}7U_{ном} \le U_{нх} \le 1{,}1U_{ном}$) программой обработки данных многоканального цифрового осциллографа формируются векторы мгновенных значений времени $\{\tau_k\}$ фазных токов $\{i_{A,k}\}$, $\{i_{B,k}\}$, $\{i_{C,k}\}$ и напряжений $\{u_{A,k}\}$, $\{u_{B,k}\}$, $\{u_{C,k}\}$. После этого рассчитываются массивы данных для эффективных характеристик намагничивания электротехнической стали $\{H_k, B_k\}$. Указанные характеристики нормируются по данным опыта ХХ для номинального напряжения (рис. 2).

По сравнению с гистерезисными характеристиками увеличение площади, ограниченной экспериментальными характеристиками намагничивания стали магнитной системы трансформатора (рис. 2), что обусловливается удельным потерями от вихревых токов и дополнительными удельными потерями от технологических факторов: раскроя пакетов магнитной системы, шихтовки и прессования магнитной системы и т.п. [7].

Для описания экспериментальных характеристик намагничивания (рис. 2) применяется JA-модель [24], которая позволяет учесть обратимую и необратимую составляющие намагничивания. Для определения пяти компонентного вектора

[1] Appendix 1

эмпирических коэффициентов JA-модели по данным однофазных опытов XX используется методика, предложенная в работе [25].

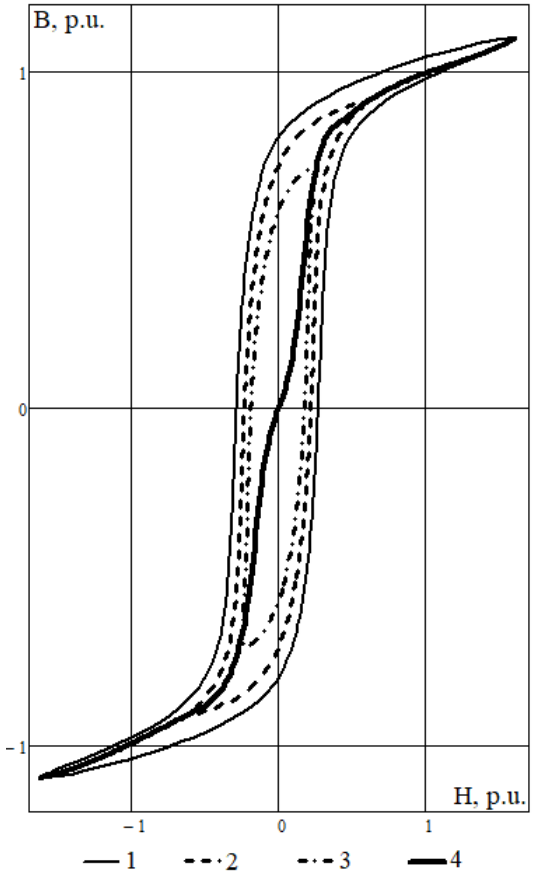


Рис. 2. Нормированные характеристики стали шихтованной магнитной системы (1 – 110%$U_{фном}$; 2 – 90%$U_{фном}$; 3 – 80%$U_{фном}$; 4 – основная характеристика). [2]

На внутренних границах подобластей (рис. 1) задаются условия сопряжения тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля [23]. Принимаются однородные граничные условия на внешней границе расчетной области, которая имеет сферическую форму для 3D-геометрической модели (рис. 1а) и форму круга для 2D-геометрической модели (рис. 1б). Для обеспечения точности моделирования диаметры внешних границ должны быть в три раза больше диагональных размеров магнитной системы [17].

3D и 2D математические модели магнитного поля (2) с условиями сопряжения, однородными условиями на внешних границах и условиями калибровки Кулона реализуются методом установления для однородных начальных условий [23]. В общем случае начальные условия Коши должны соответствовать первому закону коммутации для момента подключения к испытательному трансформатору "Y/D" схемы XX, коммутируемой средствами Comsol Multiphysics [23], (Рис.1).

Авторами [23] обосновано, что геометрическая симметрия расчетной области относительно плоскости x0z, обуславливает симметрию магнитных процессов в режиме XX. Поэтому для числовой реализации 3D модели магнитного поля (1) рассматривается только половина расчетной сферической области, которая отделяется плоскостью, параллельной плоскости x0z, проходящей через оси стержней магнитной системы. На границе этой плоскости задаются граничные условия симметрии [23]. Благодаря сокращению объема 3D геометрической области в 2 раза обеспечивается пропорциональное уменьшение временных и вычислительных ресурсов, необходимых для реализации метода конечных элементов.

[2] Appendix 1

Хотя поперечные сечения участков стержней и ярем имеют различную конфигурацию, по действующим инженерным методикам [1,2,7] их площади определяют, как площадь круга одинакового диаметра. Для расчета активных площадей применяют соответствующие каждому участку коэффициенты круга, заполнения и усиления. Произведение указанных коэффициентов всегда должно быть меньше единицы.

По данным [23] в режиме ХХ магнитное поле локализуется в магнитной системе трехфазного силового трансформатора. Для уменьшения погрешностей токов ХХ и невязок между данными 2D и 3D моделирования реализуется конформное отображение круговых областей в поперечных сечениях стержней и ярем на полосы [23]. Однако отличия в распределении магнитных потоков по шихтованным пакетам магнитной системы будут обусловливать дополнительные токовые погрешности в 2D моделях, значения которых требуют оценки.

Токовые погрешности ХХ необходимо определять путем верификации данных 2D и 3D моделирования и их валидации с экспериментом. Для обобщения и визуализации данных схемного моделирования и взаимосвязанного моделирования магнитного поля для опытов ХХ приводятся временные изменения нормированных фазных токов, определяемых отношениями их мгновенных значений к амплитуде тока ХХ опытного трансформатора (рис. 3).

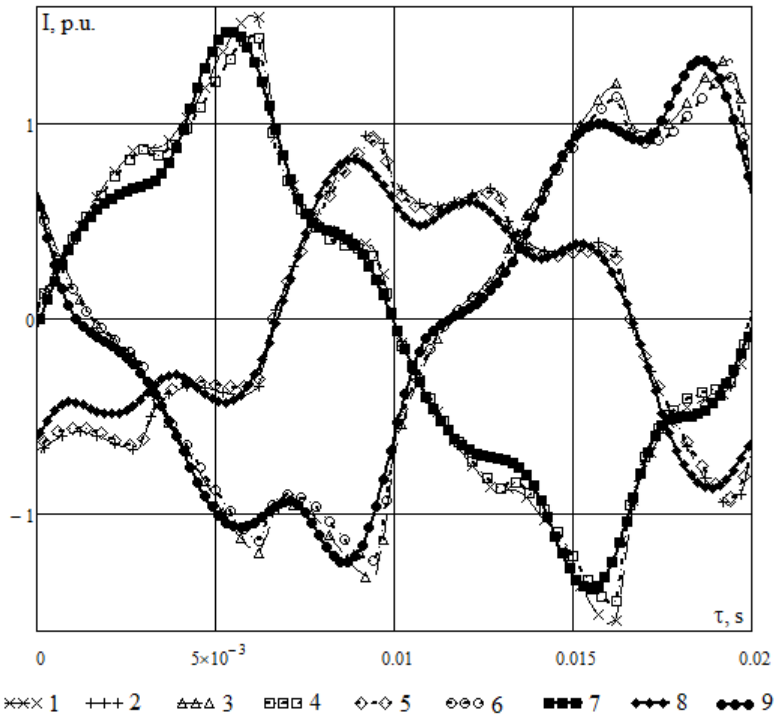


Рис.3. Временные зависимости токов ХХ в фазах трансформатора, верификация и валидация схемных моделей, сопряженных с 3D и 2D моделями магнитного поля (1 – ток ХХ в фазе А (2D моделирование); 2 – ток ХХ в фазе В (2D моделирование); 3 – ток ХХ в фазе С (2D моделирование); 4 – ток ХХ в фазе А (3D моделирование); 5 – ток ХХ в фазе В (3D моделирование); 6 – ток ХХ в фазе С (3D моделирование); 7 – ток ХХ в фазе А (эксперимент); 8 – ток ХХ в фазе В (эксперимент); 9 – ток ХХ в фазе С (эксперимент))[3].

По результатам моделирования и экспериментальным исследованиям впервые установлено, что временные изменения фазных токов ХХ характеризуются несимметричными фазовыми сдвигами, которые достигают 8–12 электрических градусов (рис. 3), и несинусоидальностью со значительным влиянием нечетных высших гармонических составляющих, амплитуды которых уменьшаются от 21–24% для третьей и пятой гармоник до 4% и 0,7% для седьмой и девятой гармоник включительно.

[3] Appendix 1

Результаты 3D и 2D моделирования, а также экспериментальные данные для фазных токов являются качественно подобными друг к другу как по фазовым сдвигам, так и по характеру изменений во времени (рис. 3). Токовые невязки 2D модели равны 6,12%, 4,49%, 6,08% для действующих значений токов в фазах A, B, C и 5,69% для действующего значения тока XX по сравнению с результатами 3D моделирования. По сравнению с экспериментом токовые погрешности для действующих значений тока XX составляют 1,41% для 3D модели и 5,18% для 2D модели. Токовая погрешность для расчетов по известной инженерной методике [1] существенно выше и приближается к 8,5%.

Для опытного трансформатора действующие значения фазных токов в фазах A, B и C составляют 113,2%, 72,4%, 112,9% от действующего значения тока XX трансформатора. Это приводит к увеличению действующего значения первой гармонической составляющей тока XX обратной последовательности фаз до 27,91% и уменьшению до 5,08% для прямой последовательности фаз.

При сравнении с опытными данными относительные погрешности расчета потерь XX составляют: 1,2% – для 3D модели, 3,2% – для 2D модели и 9,2% – для инженерной методики [7].

Верификация и валидация данных моделирования подтвердила высокую точность усовершенствованного подхода, основанного на синтезе схемных моделей XX с конечно-элементными моделями магнитных полей, подтвердила существенное повышение точности расчетов паспортных параметров режима XX силового трехфазного трансформатора по сравнению с инженерной методикой [7].

Низкая точность инженерных методик расчета параметров XX обусловлена, прежде всего, допущениями по электрической симметрии и синусоидальным изменениям фазных токов XX. Поэтому даже модификации этих методик, использующие вектора корректирующих эмпирических коэффициентов, должны иметь локальные области применения, например, для модернизации отдельных типов серийных трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен усовершенствованный подход для схемного моделирования режима XX трехфазных силовых трансформаторов, который позволяет реализовать синтез схемных моделей опыта XX с 3D и 2D моделями магнитных полей в трехфазных силовых трансформаторах для мгновенных значений напряжений и токов XX, а также позволяет учесть несинусоидальный характер их временных изменений, особенности конструктивного исполнения активных частей, влияние гистерезисных явлений и вихревых токов на нелинейные свойства магнитных материалов. Научная новизна усовершенствованного подхода к моделированию электромагнитных процессов заключается в сопряжении в единую модель объектов внешней сети, которые представлены схемной моделью, с исследуемым в режиме холостого хода трансформатором, для которого процессы преобразования электрической энергии переменного тока представлены пространственной моделью магнитного поля.

Новый подход к определению магнитных характеристик стали магнитной системы по данным однофазных опытов XX силового трансформатора позволяет учесть совместное влияние свойств гистерезиса и вихревых токов на удельные потери и мощность намагничивания. Он характеризуется высокой точностью описания взаимосвязей между индукцией и напряженностью магнитного поля.

Все это обеспечивает высокую точность расчетов паспортных параметров XX. По сравнению с данными опыта XX токовая погрешность и относительная погрешность для потерь XX составляют 1,41% и 1,2% для 3D модели; 5,18% и 3,2% для 2D модели трехфазного силового трансформатора.

Установлено, что в режиме XX токи в фазах трансформатора характеризуются несимметричностью и несинусоидальностью. В результате их действующие значения в фазах A, C возрастают на 12,9–13,2%, а в фазе B уменьшаются на 28,6% относительно тока XX трансформатора.

С учетом особенностей симметрии 3D области с активной частью трансформатора предложено применить граничные условия симметрии магнитного поля на поверхности плоскости с осями стержней магнитной системы, что позволяет без потери точности расчетов сократить в 2 раза объем области

моделирования, число конечных элементов, вычислительные ресурсы и время расчетов.

Применение метода конформных преобразований для перехода от 3D к 2D моделям позволяет для числовой реализации в режиме XX трехфазного силового трансформатора более чем на порядок сократить объем вычислительных ресурсов и затраты времени при условии ограничения токовых погрешностей на уровне 5–6%.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

[1]**Fig. 1.** 3D (a) and 2D (b) circuit-geometric models of the three-phase power transformer in experimental idling mode.

[2]**Fig. 2.** Setting characteristics of steel for laminated core (1 – 110%U_{fnom}; 2 – 90%U_{fnom}; 3 – 80%U_{fnom}; 4 – basic characteristic)

[3]**Fig. 3.** The time-dependence idle currents in transformer phases, and their verification and validation for 3D and 2 D circuit-field models (1 – no-load current phase A (2D simulation); 2 – no-load current phase B (2D simulation); 3 – no-load current phase C (2D simulation); 4 – no-load current phase A (3D simulation); no-load current phase B (3D simulation); 6 – no-load current phase C (3D simulation); 7 – no-load current phase A (experiment); 8 – no-load current phase B (experiment); 9 – no-load current phase C (experiment))

Литература (References)

[1] Kulkarni, S. V. Transformer Engineering: Design and Practice. New York, 2004, 478 p.

[2] Biki, M. A. Proektirovanie silovykh transformatorov. Raschet jsnivnykh parametrov. [Design of power transformers. Calculation of the main parameters]. Moscow, 2013. – 612 p.

[3] Novash, V.I., Rumyancev Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki matlab-simulink s uchetom nasycheniya magnitiprivoda [Calculation of parameters of the model of a three-phase transformer from the matlab-simulink library taking into account the saturation of the magnetic core]. *Energetika. Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edinenij SNG*, 2015, no. 1, pp. 12–24. (in Russian).

[4] Schiop, A., Popescu, V. Pspice simulation of power electronics circuit and induction motor drives. *Revue Roumaine des Sciences Techniques–Serie Electrotechnique et Energetique*. 2007, vol. 52, No. 1, pp. 33–42. (in English).

[5] Lup'e, A. I. Process vklyucheniya silovogo transofrmatora na holostoj hod i korotkoe zamykanie [The process of switching power transfrmator on idle and short circuit]. *Elektrotekhnik*a, 2008, no. 2, pp. 2–18. (in Russian).

[6] Lejtes, L. V. Elektromagnitnye raschety trasnfomatorov i reaktorov [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, 1981, 365 p. (in Russian).

[7] Tihomirov, P. M. Raschet transformatorov [Transformer Calculation]. Moscow, 1986, 528 p. (in Russian).

[8] Jamali, M., Mirzaie, M., Asghar-Gholamian S. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions. *Elektronika Ir Elektrotechnika*. 2011, Vol. 109, No. 3, pp. 17–20. doi: 10.5755/j01.eee.109.3.162

[9] Singh, A. K., Patel, S. Mitigation of Inrush Current For Single Phase Transformer by Control Switching Method. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*, 2015, Vol. 4, pp. 146–150. (in English).

[10] Taghikhani, M. A., Sheikholeslami, A. Taghikhani, Z. Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform. *IJEEE*, 2015, Vol. 11, No. 2, pp. 174–183. (in English). Avaliable at: http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf.

[11] Chiesa, N. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis [Text] / N. Chiesa, B. A. Mork, H. K. Hoidalen // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2010. – V. 25. – N. 4. – P. 2599–2608. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2045518

[12] Khederzadeh, M. Mitigation of the impact of transformer inrush current on voltage sag by TCSC [Text] / M. Khederzadeh // *Electric Power Systems Research*. – 2010. – V. 80. – N. 9. – P. 1049–1055. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.01.011

[13] Tihovod, S. M. Modelirovanie perekhodnyh processov v transformatorah na osnove magnitoehlektricheskih skhem zameshcheniya [Transient modeling of transformers based on magnetoelectric equivalent circuits] *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 2014, no. 2, pp. 59–68. (in Russian). doi: 10.15588/1607-6761-2014-2-8

[14] Lazarev, N. S., Shul'ga, R. N., Shul'ga, A. R. Toki vklyucheniya silovykh [Currents enable power Electrical Engineering]. *Elektrotekhnika*, 2010, no. 11, pp. 11–17. (in English).

[15] Majumder, R., Ghosh S., Mukherjee, R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, Vol. 5, No. 3, pp. 3300–3306. (in English). DOI: 10.15680/IJIRSET.2016.0503107

[16] Yarymbash, D. S., Yarymbash, S. T., Kotsur, M. I., Litvinov, D. O. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 1, pp. 65–

74. (in English). doi: 10.15588/1607-3274-2018-1-8

[17] Yarymbash, D. Influence of the electrodes blanks location on the electric heating power distribution in the acheson furnaces core. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, no. ***1***, pp.5-11. (in English). doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-1

[18] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2016, no. ***2***, pp. 43-50. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5

[19] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2017, no. ***1***, pp. 24-30. (in English). doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4

[20] Ostrenko, M. V., Tihovod, S. M. Raschet poter' v elementakh konstrukcii silovykh transformatorov i reaktorov metodom konechnykh ehlementov s granichnymi usloviyami impedansnogo tipa [Calculation of losses in structural elements of power transformers and reactors by the finite element method with impedance boundary conditions]. *Elektrotekhnika i ehlektroenergetika*, 2016, no. 2, pp. 33–42. (in Russian). doi: 10.15588/1607-6761-2016-2-4

[21]. Pajkov, I. A., Tikhonov, A. I. Analiz modelej dlya ehlektromagnitnogo rascheta silovykh transformatorov [Analysis of models for electromagnetic calculation of power transformers]. *Vestnik IGEHU*, 2015, no. 3, pp. 38–43. (in Russian).

[22] Podol'cev, A. D., Kontorovich, L. N. Chislennyj raschet ehlektricheskikh tokov, magnitnogo polya i ehlektrodinamicheskikh sil v silovom transformatore v avarijnykh rezhimakh s ispol'zovaniem MATLAB/SIMULINK i COMSOL [Numerical calculation of electric currents, magnetic field and electrodynamic forces in a power transformer in emergency mode using MATLAB / SIMULINK and COMSOL]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2011, no. 6, pp. 3–10 (in Russian).

[23] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2018, no. ***2***, pp. 56-66. (in English). doi: 10.15588/1607-6761-2017-2-6

[24] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Divchuk, T. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers. *14th International Conference: Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, February 20-24, Lviv–Slavske, Ukraine, 2018, pp. 308–313. (in English). doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209

[25] Cundeva, S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Serbian Journal of Electrical engineering*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 21–30. (in English). doi: 10.2298/SJEE0801021C

[26]. Bastos, J. P. A, Sadowski, N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Boca Raton: CRC Press, 2003, 510 p. ISBN 9780203911174. doi: 10.1201/9780203911174

Сведения об авторах.

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: yarymbash@gmail.com

Коцур Михаил Игоревич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: kotsur8@gmail.com

Ярымбаш Сергей Тимофеевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: kstj06@gmail.com

Дивчук Татьяна Евгеньевна, старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: DIV2009@i.ua

Definition of Optimal Structure of Power Network

Kimstach O.Yu.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Nikolayev, Ukraine

Abstract. The purpose of the paper is to form a method for finding the optimal structure of the power network. For the basic criteria of the required method the maximum simplicity, versatility and objectivity are assumed. The properties of existing power grids of various countries and the methods of their analysis and design were analyzed. The research is based on the method of relative comparative assessments. In the paper a set of particular optimization criteria was substantiated, which objectively characterize the power network. These criteria include a complex assessment of the length, an energy assessment, a wires mass assessment and a reliability assessment. A complex length assessment consists of total length assessment of power lines and assessment of total lengths ratio of power lines to conventionally low and high voltages. The overall reliability coefficient of the power supply was proposed to use as a reliability criterion. This factor conventionally represents the level of duplication of power supply in terms of free power and transmission capacity of the power lines. The algorithm for determining the values of partial criteria was considered. The partial optimization criteria were combined using the complex additive criterion. The example of finding the optimal structure of a local distribution power network was given. As variants for the structures of the power network, the schemes of a looped, a trunk passage, a trunk-radial and a trunk with branch were used. In accordance with the method of relative comparative assessments, it was found, that the looped type is optimal.
***Keywords*:** power grid, power network, structure, method of relative comparative assessments, criterion, optimization.
DOI: 10.5281/zenodo.2650415

Determinarea structurii optime a rețelei electrice

Kimstach O. Yu.
Universitatea Națională de Construcții Navale în numele amiralul Makarov
Nikolaev, Ucraina

Rezumat. În lucrare se examinează problema determinării structurilor optime ale rețelelor electrice. Scopul principal al lucrăriiconstă în propunerea unei metode pentru determinarea structurii optime a rețelei electrice. În calitate de criterii de bază ale metodei investigate s-au selectat maximă simplitate, versatilitatea și obiectivitatea. Pentru atingerea acestui obiectiv, sa executat o analiză a proprietăților sistemelor electroenergetice existente din diferite țări, a metodelor de analiză și proiectare a acestora, au fost identificate principalele tendințe ale dezvoltării acestora și au fost luate în considerare principalele criterii de optimizare a acestora. Cercetarea se bazează pe metoda evaluărilor relative comparative. În articolul se descrie esența acestei metode. În lucrarea se argumrentează un set de criterii de optimizare specifice, care caracterizează în mod obiectiv rețeaua electrică din punctul de vedere al producătorului și al consumatorului. Aceste criterii includ o evaluare complexă a lungimii, indicilor energetici, de masă a conductoarelor și a fiabilității. Estimarea complexă a lungimii include lungimea totală a liniilor electrice și a raportului lungimii totale ale liniilor electrice de josă tensiune și tensiune înaltă. Ca criteriu de fiabilitate, s-a propus utilizarea coeficientului general de fiabilitate al siguranței alimentării de rețeaua electrică. Acest coeficient afișează în mod convențional nivelul de trzervare dubă a livrării energiei electrice în ceea ce privește capacitatea disponibilă liberă și capacitatea de transmisie a liniilor de transport. Sunt analizate cele mai comune tipuri de scheme ale rețelelor electrice. Se indică la diferențele lor fundamentale și posibilele aplicații. Se prezintă diferențele lor fundamentale și posibilele domenii de aplicații.
Cuvinte-cheie: sistem electroenergetic, rețea electrică, structura, metoda evaluărilor relative comparative, criteriu, optimizare**.**

Определение оптимальной структуры электрической сети

Кимстач О.Ю.
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
Николаев, Украина

Аннотация. В статье рассматривается вопрос поиска оптимальных структур схем электрических сетей. Основной целью работы является формирование метода поиска оптимальной структуры электрической сети. За базовые критерии искомого метода приняты максимальная простота, универсальность и объективность. Для достижения поставленной цели был проведен анализ свойств существующих электроэнер-

© Кимстач О.Ю., 2019

гетических систем различных стран, методов их анализа и проектирования, определены основные тенденции их развития, рассмотрены основные критерии их оптимизации. В основе исследований использован метод относительных сравнительных оценок, в статье изложена суть метода. В работе обоснован набор частных критериев оптимизации, которые объективно характеризуют электрическую сеть с точки зрения производителя и потребителя. Указанные критерии включают комплексную оценку длины, энергетическую оценку, оценки массы проводов и надежности. Комплексная оценка длины состоит из оценки общей протяженности линий электропередачи и оценки соотношения общих протяженностей линий электропередачи условно низкого и высокого напряжений. В качестве критерия надежности предложено использовать общий коэффициент надежности электроснабжения электрической сети. Данный коэффициент условно отображает уровень дублирования электроснабжения с точки зрения свободной мощности и пропускной способности линий электропередачи. Рассмотрен алгоритм определения значений частных критериев в соответствии с методом относительных сравнительных оценок. Частные критерии оптимизации объединены с помощью комплексного аддитивного критерия. Проанализированы наиболее распространенные типы схем электрических сетей. Показаны их принципиальные различия и возможные области применения. Приведен пример поиска оптимальной структуры локальной распределительной сети. В качестве вариантов структур электрической сети были использованы закольцованная, магистральная проходная, магистрально-радиальная и магистральная с ответвлениями схемы. В соответствии с методом относительных сравнительных оценок было установлено, что оптимальным является закольцованный тип электрических сетей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электрическая сеть, структура, метод относительных сравнительных оценок, критерий, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Основой электроэнергетики любой страны или содружества является объединенная электроэнергетическая система (ЭЭС), которая выполняет централизованное электроснабжение потребителей. Она состоит из источников электрической энергии и электрических сетей (ЭС) для ее распределения. Общая протяженность линий ЭС весьма значительна, так, например, в Северной Америке протяженность линий напряжением выше 110 кВ составляет более одного миллиона километров [1].

Обычно ЭС подразделяются на высоковольтные (системообразующие) и низковольтные (распределительные) [2]. Однако, это не меняет общность подходов к анализу структуры ЭС, т.к. вне зависимости от масштабности и назначения они сохраняют свои основные свойства и принципы построения [3].

На сегодняшний день электричество стало инструментом к социальному прогрессу [4]. Поэтому оно является неотъемлемой частью нашей жизни, и мы хотим получать его в качественном виде. Обеспечение заданного качества электроэнергии возможно только при условии нормального режима работы ЭЭС. Для этого необходимо, прежде всего, достижение бесперебойности подачи питания для всех потребителей, что возможно при наличии баланса мощностей источников и потребителей с учетом потерь на передачу и при существовании средств доставки электроэнергии от источников к потребителям. При этом, учитывая огромную разветвленность ЭС, следует обеспечить максимально кратчайшие пути доставки электроэнергии, что позволяет снизить потери мощности на передачу и, соответственно, повысить экономическую эффективность работы ЭС. Поэтому возникает проблема поиска наиболее оптимальной структуры ЭС, как проектируемой так и существующей, которая обеспечивает достижение минимальных капитальных и эксплуатационных затрат при условии максимальной надежности электроснабжения. Решение этой проблемы является достаточно сложным и многоаспектным, а также требует выполнения сложных математических расчетов.

Существует множество подходов к решению обозначенной проблемы.

В общем случае при сравнении вариантов схем ЭС используются целевые функции, которые учитывают капитальные и эксплуатационные расходы [5], общие затраты и надежность [6], общую длину линий [7], потери электроэнергии [8] и др.

Используемые целевые функции охватывают лишь определенную часть показателей и параметров ЭС, но так или иначе все они направлены на выявления наилучшего варианта структуры ЭС при условии достижения минимальных эксплуатационных и капитальных затрат. Это два всеобъемлющих целевых параметра. Иногда отделяется надежность и рассматривается как независимая целевая функция [9, 10, 11], что поясняется высокой важностью данного показателя для ЭС. Но

также следует помнить, что надежность работы ЭС определяется не только топологией самих сетей, но и законами управления ими [12]. И это является еще одним важным и определяющим вопросом, требующим отдельного детального исследования. С точки зрения известного подхода можно сказать, что правильная структура ЭС является достаточным условием для обеспечения надежного электроснабжения, а правильное управление ЭС – необходимое условие для достижения заданной бесперебойности питания нагрузок ЭС.

Таким образом, для получения объективного результата поиска оптимальной структуры ЭС необходимо использовать все три основных критерия: капитальные затраты [5], эксплуатационные затраты [5, 6, 8] и надежность электроснабжения [6].

Также следует понимать, что повышение надежности ЭС достигается за счет дублирования связей между источниками и потребителями, а это неизбежно ведет к повышению капитальных и эксплуатационных затрат и соответственно уходу от оптимальной структуры по условию экономической целесообразности. Но надежность важнее, поэтому большинство существующих сетей обладают избыточностью [13]. Нарушение электроснабжения может привести к значительным материальным убыткам, экологическим катастрофам и гибели людей, так например финансовые потери от нарушения электроснабжения в Швеции в 2013 г. составили 140 миллионов евро [9]. Поэтому в Швеции применяется административная система штрафов и вознаграждений, которая стимулирует развитее ЭС с целью повышения бесперебойности электроснабжения [9].

В большинстве исследований [2, 10, 14, 15] вопрос надежности электроснабжения рассматривается как система рисков нарушения передачи электроэнергии к потребителям при тех или иных событиях или воздействиях на ЭС. Существует множество методов оценки рисков электроснабжения [14], но большинство из них направлены на выявление критических отказов или так называемых наиболее уязвимых точек ЭЭС. В [15] делается акцент на риски из-за отказов узлов, т.е. подстанций, распределительных пунктов или электростанций, а в [10] больше внимания уделяется линиям в частности Франции, Испании и Италии, проведенный анализ показал присутствие наибольшего риска нарушения электроснабжения итальянской сети из-за ее растянутости и низкого дублирования.

Один из вариантов решения проблемы нарушения электроснабжения – применение малых генерирующих мощностей, к которым можно отнести солнечные, ветряные, дизельгенераторные и другие электростанции [16, 17, 18, 19, 20]. Но их применение порождает целый ряд проблем: нарушение режимов работы защитной аппаратуры [16], недопустимые колебания напряжения [16] и соответственно непредсказуемые режимы работы ЭС [17]. В то же время можно получить основной позитивный эффект от применения так называемой распределенной генерации – быстрое восстановление электроснабжения отдельных групп потребителей при возникновении аварийных ситуаций [18]. С экологической точки зрения применение солнечных, ветряных [17, 20], геотермальных [19] и других источников электроэнергии правильное решение, но их относительно низкая мощность и КПД, а также вид получаемого электричества требует использования специальных преобразователей для подключения на параллельную работу с ЭС. Кроме того, солнечные и ветряные электростанции вырабатывают мощность, которая существенно зависит от погодных условий и состояния оборудования, что делает эти источники электроэнергии неосновными. Поэтому базовая мощность должна генерироваться на промышленных электростанциях. При этом совокупная выработка электроэнергии от распределенной генерации в некоторых странах столь существенна, что она порождает сложности с управлением ЭЭС [16, 17], а, следовательно, этот момент тоже следует учитывать при проектировании и анализе структуры ЭС.

При проектировании, модернизации и эксплуатации ЭС необходимо наличие таких технических возможностей управления, которые позволяют обеспечить оптимальный режим работы [21]. А он может быть подвержен различным внутренним или внешним факторам воздействия, которые способны привести к нарушениям электроснабжения или даже развалу ЭЭС. К таким воздействиям относятся внешние природные проявления в виде стихийных бедствий [22], структура и состав оборудования ЭЭС должны быть способны противостоять этим воздействиям.

С другой стороны, сам неконтролируемый рост ЭС можно рассматривать как фактор провоцирования нормального режима рабо-

ты, особенно с учетом нагрузки на диспетчеров [23]. Определение мощности нагрузок и графика их работы также является сложной задачей [24] и вносит свои трудности при определении режима работы ЭС. Зачастую благие устремления в виде компенсации реактивной мощности тоже могут стать причиной создания значительных проблем с обеспечением заданного режима работы [25]. И даже плановое развитие или объединение ЭЭС, как это происходило в Европе, может инициировать значительные перетоки мощности, перераспределение потоков мощностей и нарушение качества электроэнергии [26].

Вопрос оптимизации процесса развития ЭЭС обычно рассматривается отдельно [27], его результаты чаще всего носят рекомендательный характер, т.к. уже на стадии проектирования закладываются некоторые плановые операции развития ЭЭС, которые обычно подвергаются пересмотру вследствие активного и зачастую непредсказуемого развития генерирующих мощностей и состава потребителей.

Таким образом, возникает задача выявления наиболее оптимальной структуры ЭС при условии обеспечения минимума капитальных и эксплуатационных затрат, высокой надежности электроснабжения, с учетом характерных особенностей состава и развития современных ЭЭС. Такой комплексный и объективный подход к решению задачи структурной оптимизации ЭС отсутствует в рассмотренных работах.

Целью исследования является формирование метода анализа структурных схем ЭС и выбора оптимального варианта. Это предоставит возможность осуществления надежного надзора за эксплуатацией системы, увеличит надежность систем противоаварийной автоматики и защиты.

Цель статьи – сформировать простой, универсальный и объективный метод структурной оптимизации ЭС на основе метода сравнительных оценок.

МЕТОД ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК

Методологической базой процесса поиска оптимальной структуры ЭС является метод относительных сравнительных оценок, который обеспечивает выполнение сравнения разных вариантов реализации ЭС на основе анализа их технических показателей. Данный метод является своеобразной подменой чистой структурной оптимизации и обеспечивает определение наиболее оптимального по техническим показателям варианта структуры (схемы) объекта проектирования [28].

В общем виде по каждой *j*-той сравнительной оценке формируются сравнительные таблицы (табл. 1), каждому *i*-тому варианту технической реализации ЭС предоставляется количество баллов $K_{i,j}$ в соответствии со сравнительным критерием.

Таблица 1[1].

Сравнительная таблица по частному критерию

Вариант технической реализации ЭС (power network variant)	Сравнительный критерий (comparative criterion) $k_{i,j}$	Количество баллов (points amount) $K_{i,j}$
Вариант 1 (variant 1)	$k_{1,j}$	$K_{1,j}$
Вариант 2 (variant 2)	$k_{2,j}$	$K_{2,j}$
……	……	……
Вариант *i* (variant *i*)	$k_{i,j}$	$K_{i,j}$
……	……	……
Вариант *n* (variant *n*)	$k_{n,j}$	$K_{n,j}$

Отдельная частная оценка

$$K_{i,\text{о}} = \begin{cases} K_{\text{о опт}} / K_{i,\text{о}}, \text{если} \, \mathbf{min} \, K_{i,\text{о}}; \\ K_{i,\text{о}} / K_{\text{о опт}}, \text{если} \, \mathbf{max} \, K_{i,\text{о}}; \\ 1, \text{если} \, K_{i,\text{о}} = K_{\text{о опт}}, \end{cases}$$

где $K_{\text{о опт}}$ – оптимальное значение частного критерия по оценке О.

Наилучший вариант получает максимальную оценку, которая равняется 1, а другие – оценку, которая равняется отношению *i*-того критерия к наилучшему или, наоборот, в зависимости от типа поиска оптимума: максимума или минимума.

Применение относительных оценок, по сравнению с целочисленными [28], дает более объективный результат.

В дальнейшем формируется общая таблица (табл. 2), в которой выполняется суммирования полученных баллов для каждого варианта ЭС.

Итоговая оценка

$$K_{i,\Sigma} = \sum_{j=1}^{m} K_{i,j} \ . \qquad (1)$$

[1] см. Appendix 1

Таблица 2[1].

Итоговая сравнительная таблица

Вариант технической реализации ЭС (power network variant)	Количество баллов по отдельному критерию (points amount of the criterion)					Итоговое количество баллов (total points) $K_{i,\Sigma}$
	$K_{i,1}$	⋮	$K_{i,j}$	⋮	$K_{i,m}$	
Вариант 1 (variant 1)	$K_{1,1}$	⋮	$K_{1,j}$	⋮	$K_{1,m}$	$K_{1,\Sigma}$
Вариант 2 (variant 2)	$K_{2,1}$	⋮	$K_{2,j}$	⋮	$K_{2,m}$	$K_{2,\Sigma}$
……	……	. . .	…...	. . .	…..	…..
Вариант i (variant i)	$K_{i,1}$	⋮	$K_{i,j}$	⋮	$K_{i,m}$	$K_{i,\Sigma}$
……	……	⋮	…..	⋮	…..	…..
Вариант n (variant n)	$K_{n,1}$	⋮	$K_{n,j}$	⋮	$K_{n,m}$	$K_{n,\Sigma}$

Для реализации сравнения необходимо выбрать наиболее весомые технические показатели, которые фактически являются критериями параметрической оптимизации объекта проектирования. Обычно таких частных критериев больше одного, поэтому общий критерий оптимизации является комплексным. Необходимо, чтобы они не были все связанными, а находились в конфликте (минимум один), тогда будет существовать четко выраженный оптимальный вариант.

В общем случае все оценки рассматриваются как равновесомые. Итоговая оценка построена по принципу реализации аддитивного комплексного критерия согласно уравнению (1).

Составные итоговой оценки изображены на рис. 1. В качестве критерия капитальных затрат использованы оценка длины ЛЭП, традиционно применяемая при проектировании и анализе систем электроснабжения [7], и оценка общей массы проводов, которая дополняет и расширяет оценку длины с учетом сечения проводов. В качестве критерия эксплуатационных затрат обычно используется энергетическая оценка в виде потерь мощности [5, 6] или КПД. В качестве критерия надежности использована условная оценка надежности электроснабжения, построенная по общим принципам обеспечения бесперебойности, как в [6].

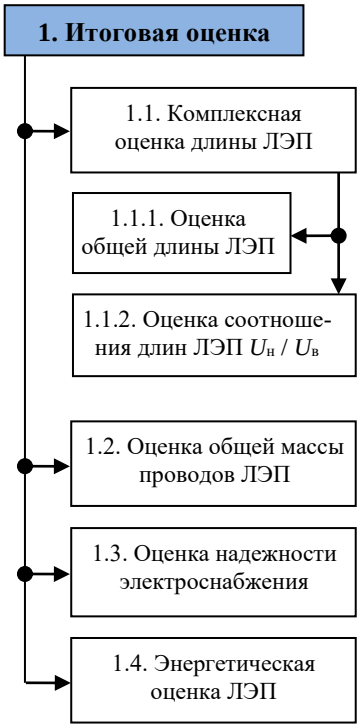


Рис. 1. Структура итоговой оценки варианта схемы ЭС.[1]

Наличие четырех частных оценок представляет высокую достоверность того, что в итоговой сравнительной таблице относительных оценок одинаковых результатов не будет, если же такое случится, возможно добавление дополнительных критериев: количество (общая мощность) трансформаторов на подстанциях, общие потери реактивной мощности в ЛЭП, количество опор и др.

Для определения оптимальной структуры

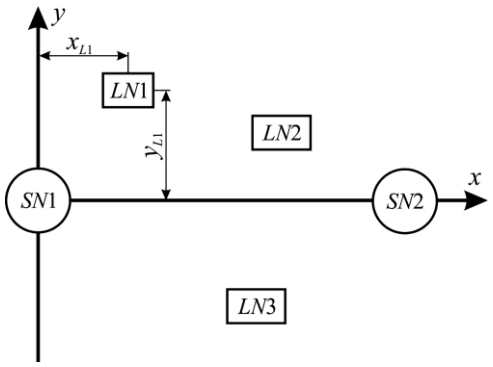
[1] см. Appendix 1

ЭС необходимо:

1. Сформировать перечень возможных вариантов схем ЭС, для каждой из них выполняются:
   - расчеты топологических данных;
   - распределение мощностей по отдельным линиям;
   - выбор номиналов напряжений линий;
   - выбор опор и токоведущих частей;
   - расчеты потерь мощности;
   - расчет надежности электроснабжения нагрузочных узлов.
2. Выполнить сравнительный анализ полученных вариантов ЭС по методу относительных сравнительных оценок, для этого следует:
   - рассчитать оценки по частичным критериям;
   - определить итоговые оценки и сравнить их.

Дальнейшие исследования выполняются в общем виде и на примере типового решения для локальной ЭС. Как показано в [7] подавляющее количество узлов в ЭС имеют две связи, т.е. реализуется основное правило построения ЭС: для обеспечения заданной надежности электроснабжения необходимо иметь две независимые линии питания. Даже для конечных неответственных магистральных ЭС проходные узлы также имеют две связи, что позволяет в качестве типового примера применения предложенного алгоритма рассмотреть небольшую ЭС (рис. 2), состоящую из двух узлов питания (*SN*1 и *SN*2) и трех групповых потребителей (*LN*1, *LN*2 и *LN*3).

При этом задано следующее: *SN*1 представляет собой распределительный пункт высоковольтной линии электроснабжения с напряжением U_{S1}, внутренними активным и индуктивным сопротивлениями R_{S1} и X_{S1} и максимальной полной мощностью подключения S_{S1}; *SN*2 – теплоэлектроцентраль (другой тип локального источника электроэнергии или другой распределительный пункт, но, как правило, с другим уровнем напряжения) с напряжением U_{S2}, внутренними активным и индуктивным сопротивлениями R_{S2} и X_{S2}, максимальной полной мощностью подключения S_{S2} и расстоянием до *SN*1 x_{S2}; каждый из узлов нагрузки характеризуется напряжением питания U_{Li}, максимальной полной мощностью S_{Li}, коэффициентом мощности $\cos\varphi_{Li}$, и расположением согласно системе координат (рис. 2) с абсциссой x_{Li} и ординатой y_{Li}, а также характеристикой категорий нагрузки по ответственности.



SN1 и SN2 – узлы питания,
LN1, LN2 и LN3 – узлы нагрузки

Рис. 2. Условная схема расположения объектов электроснабжения.[1]

Выбор схемы ЭС с общим количеством узловых элементов в пять достаточно сложный вопрос, потому что общее теоретическое возможное количество вариантов соединений определяется сотнями. При этом необходимо учитывать категории потребителей и их мощность, соотношение мощностей узлов питания и потребителей и др.

На рис. 3-8 приведены основные наиболее технически обоснованные варианты электроснабжения потребителей [28]. Нужно учитывать, что изображенные схемы могут быть на каждом участке выполнены одноцепными или двухцепными, а это порождает еще дополнительные варианты отдельных схем.

Схема (рис. 3) обеспечивает высокую надежность электроснабжения и простоту подключения трансформаторных подстанций (ТП), ее нужно выбирать при значительном количестве потребителей I и II категорий.

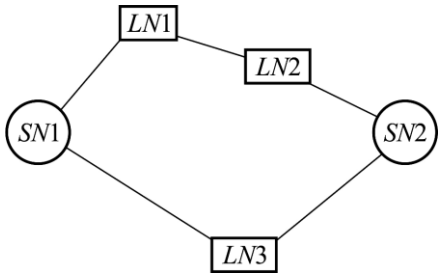


Рис. 3. Кольцевая схема электрических сетей.[1]

Следующая схема (рис. 4) имеет меньшую общую протяженность линий и является более простой, но имеет ограничение относительно распределения электроэнергии, а также характеризуется необходимостью приме-

[1] см. Appendix 1

нения более мощных ТП.

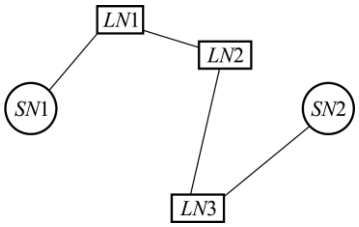


Рис. 4. Магистральная проходная схема.[1]

Примером хаотичного развития систем электроснабжения является схема (рис. 5). Она характеризуется избыточностью ЛЭП, поэтому использовать ее при проекте новой или модернизации существующей системы ЛЭП не следует.

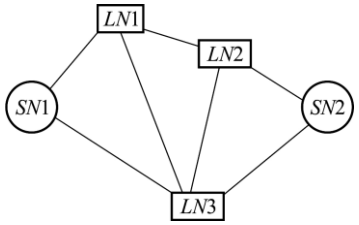


Рис. 5. Многоконтурная схема электрических сетей.[1]

Автономная радиальная схема (рис. 6) характеризуется минимализмом построения системы ЛЭП.

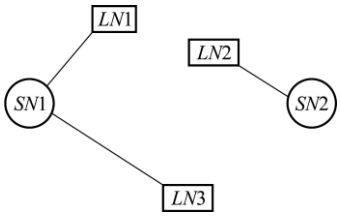


Рис. 6. Автономная радиальная схема электрических сетей.[1]

Она традиционно является первым этапом развития электроснабжения в новом регионе, но на этом этапе нужно прогнозировать возможные пути дальнейшего развития ЭС, иначе существует возможность получить в дальнейшем вариант схемы (рис. 5). Данную схему можно применять при избыточности мощностей узлов питания и при использовании двухцепных ЛЭП. Также она может иметь место при аварийных ситуациях (например, для схем рис. 3 и рис. 7) и рассматриваться как временное явление. Примером более простого развития предыдущего варианта является магистрально-радиальная схема (рис. 7). Ее можно применять при дефиците мощности одного из источников или при значительном количестве потребителей I категории, которые нуждаются в резервировании электроснабжения, при условии, что расстояние между *SN*1 и *SN*2 значительно больше расстояния между ними и соответствующими потребителями.

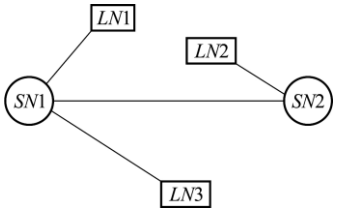


Рис. 7. Магистрально-радиальная схема электрических сетей[1]

Схема (рис. 8) является аналогом схемы (рис. 4), но отличается прямой связью *SN*1 и *SN*2, что предоставляет возможность обеспечить более экономические условия перетока электроэнергии. Такая схема применяется при системном подходе развития электроэнергетических сетей, что ведет к минимизации потери мощности.

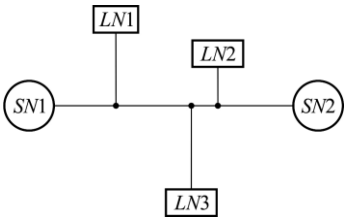


Рис. 8. Магистральная с ответвлениями схема электрических сетей.[1]

При выборе любой схемы нужно помнить, что потребители I и II категорий должны иметь питания от двух независимых источников, если их мощность не очень велика по сравнению с общей, тогда возможно применение автономных генерирующих установок.

Расстояния между объектами электроснабжения (рис. 2) являются основными исходными параметрами для выбора типа системы электроснабжения и уровней напряжения на каждом участке. Для их расчетов используются координаты объектов электроснабжения [27].

При распределении мощности узлов питания по отдельным ЛЭП в соответствии с вариантом схемы ЭС необходимо учитывать расстояния между источниками и потребителями. Целесообразно выполнить распределения мощностей источников между ближайшими узлами нагрузок в соответствии с их мощностями.

Обычно мощность источников электро-

[1] см. Appendix 1

энергии выше, чем мощность потребителей, это отношение характеризуется с помощью коэффициента загрузки

$$k_s = \sum_{q=1}^{n} S_{Lq} \Big/ \sum_{k=1}^{d} S_{Sk} ,$$

где q – количество узлов нагрузки ЭС; d – количество узлов питания ЭС.

При расчете мощностей ЛЭП следует учитывать коэффициент развития k_e, который отображает плановое увеличение мощности нагрузок в узлах получающих питание от соответствующего источника. Тогда общий коэффициент мощности сети для узла питания

$$k_{sei} = k_s k_{ei} .$$

При этом полученный коэффициент k_{sei} должен быть меньше или равен 1. Если он получился больше 1, то это говорит о существующем или перспективном дефиците электроэнергии.

При выборе мощностей ЛЭП с помощью уравнения баланса мощностей расчетные мощности отдельных источников, МВА

$$S'_{Si} = S_{Si} k_{sei} .$$

Выходя из значений S'_{Si} и S_{Si}, следует рассчитывать мощности ЛЭП соответствующих вариантов схем ЭС.

Расчет основных параметров ЛЕП (напряжение, сечение проводов, протяженности, сопротивления, потери мощности, КПД) можно выполнить в соответствии с формулами, приведенными в [28].

Предложенная совокупность сравнительных оценок в работе [28] обеспечивает проведение сравнительного анализа с акцентом на экономические показатели, но для ЭС очень важно обеспечить надежность электроснабжения, которую нужно учесть путем применения соответствующей оценки. Решение этого вопроса состоит во введении критерия надежности – коэффициента надежности электрической сети $k_{нм}$. Его расчет выполняется по алгоритму, приведенному ниже.

Пропускная способность i-той ЛЭП, МВА

$$S_{\max i} = \sqrt{3} U_i q_i \Delta_{\max i} ,$$

где U_i – линейное напряжение i-той ЛЭП, кВ; q_i – площадь сечения провода i-той ЛЭП, мм^2; $\Delta_{\max i}$ – максимально допустимая плотность тока i-той ЛЭП, кА / мм^2.

Она отображает самую большую полную мощность, которую можно передать по каждой отдельной ЛЭП, входящей в состав ЭС.

Коэффициент линии

$$k_{лij} = \begin{cases} S_{\min k} / S_{Li} \text{ при } S_{\min k} / S_{Li} < 1 \\ 1 \text{ при } S_{\min k} / S_{Li} \geq 1, \end{cases}$$

где i – номер узла нагрузки; j – вариант схемы электроснабжения от узла питания; k – звено j-ого варианта с минимальной пропускной мощностью $S_{\min k}$ между узлами питания и нагрузки.

Коэффициент $k_{лij}$ рассчитывается с учетом наиболее узких мест на пути передачи электрической энергии от каждого узла питания к соответствующему узлу нагрузки. Фактически коэффициент $k_{лij}$ показывает, какую максимальную мощность можно передать определенным путем от выбранного узла питания к соответствующему узлу нагрузки.

Коэффициент свободной мощности для i-того узла нагрузки

$$k_{пij} = \begin{cases} \dfrac{S_{Sm} - \sum S_{La}}{S_{Li}} \text{ при } \dfrac{S_{Sm} - \sum S_{La}}{S_{Li}} < 1 \\ 1 \text{ при } \dfrac{S_{Sm} - \sum S_{La}}{S_{Li}} \geq 1, \end{cases}$$

где m – номер узла питания; a – узлы нагрузки между узлом питания и i-тым узлом нагрузки по варианту j.

Коэффициент $k_{пij}$ показывает, какой существует максимальный запас мощности для соответствующего узла нагрузки от выбранного узла питания при определенном пути передачи электрической энергии.

Коэффициент надежности электроснабжения i-того узла нагрузки

$$k_{нi} = \sum_{j=1}^{n} k_{лij} k_{пij} ,$$

где n – количество вариантов снабжения электроэнергии i-того узла нагрузки.

Коэффициент $k_{нi}$ это аддитивный показатель, который состоит из мультипликативных объединений коэффициентов $k_{лij}$ и $k_{пij}$. Фактически он отображает уровень дублирования электроснабжения для отдельно взятого узла нагрузки.

Общий коэффициент надежности электроснабжения электрической сети

$$k_{\text{нм}} = \sum_{i=1}^{p} k_{\text{н}i} \frac{S_{Li}}{\sum_{i=1}^{p} S_{Li}},$$

где p – количество узлов нагрузки.

Коэффициент $k_{\text{нм}}$ представляет собой усредненную оценку надежности электроснабжения для всех узлов нагрузки, которая получается как некоторая аддитивная оценка с весовыми коэффициентами, отображающие относительную мощность соответствующего узла нагрузки.

Чем выше значение $k_{\text{нм}}$, тем лучше с точки зрения надежности, т.к. это означает, что соответствующий вариант схемы ЭС имеет больший уровень резервирования электроснабжения. Следует отметить, что коэффициент $k_{\text{нм}}$ пригоден лишь для расчетов сравнительных оценок, он не отображает в полной мере уровень дублирования и соответственно надежности электроснабжения. Это объясняется пренебрежением двойного использования пропускной способности ЛЭП в отдельных случаях. Для формирования результирующей комплексной относительной оценки для сравнения вариантов схем ЭС в качестве частных критериев используются комплексная оценка длины ЛЭП, оценка общей массы проводов, энергетическая оценка и оценка надежности электроснабжения (рис. 1). Такой перечень оценок наиболее объективно предоставляет возможность определить наилучший вариант схемы ЭС. Первая частная оценка – комплексная оценка длины ЛЭП – состоит из:

- $K_{i,\text{од}}$ оценки общей длины ЛЭП;
- $K_{i,\text{сд}}$ оценки соотношения общих длин ЛЭП $U_{\text{н}} / U_{\text{в}}$.

Лучше всего будет если длина ЛЭП будет как можно меньше, потому что это позволит уменьшить общую площадь отчуждения земли, уменьшить капитальные затраты на строительство ЛЭП, получить кратчайший срок сооружения ЛЭП, уменьшить эксплуатационные затраты, связанные с плановым техническим обслуживанием оборудования ЛЭП и др. Поэтому наименьшая по длине ЛЭП получит 1 балл.

Вторая составляющая – соотношение общих длин ЛЭП $U_{\text{н}} / U_{\text{в}}$ – будет наилучшей при условии, что напряжение ЛЭП будет меньшим, т.е. чем выше полученное значение соотношения, тем лучше, а соответствующий вариант получает 1 балл. Если напряжение ниже, тогда проще и быстрее выполняется построение ЛЭП, используются более дешевые электрические аппараты для управления и защиты ЛЭП и т.д.

Расчеты комплексной оценки длины ЛЭП для i-того варианта схемы выполняется по формуле:

$$K_{i,\text{кд}} = K_{i,\text{од}} + K_{i,\text{сд}}.$$

Оценка общей массы проводов $K_{i,\text{м}}$ определяется в соответствии с общей массой проводов ЛЭП, чем меньшая масса, тем лучше.

Масса проводов отдельной j-того участка i-того варианта схемы определяется по удельной массе $m_{\text{п}}$ и длине l, т

$$M_{i,j} = m_{\text{п}i,j} l_{i,j} \cdot 10^{-3}.$$

Общая масса проводов i-того варианта схемы ЭС

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} M_{i,j}.$$

Энергетическая оценка $K_{i,\text{э}}$ может быть построенная на основании учета общих потерь активной мощности или КПД ЛЭП i-того варианта схемы ЭС. Понятно, что чем меньше общие потери активной мощности (выше КПД), тем лучше. Общие потери мощности ЛЭП i-того варианта схемы ЭС

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^{n} \Delta P_{\text{л}i,j}.$$

Для i-того варианта схемы ЭС КПД

$$\eta_i = 1 - \frac{\Delta P_i}{\Delta P_i + \sum_{i=1}^{p} S_{Li} \cos\varphi_{Li}}.$$

Итоговая оценка

$$K_{i,\Sigma} = K_{i,\text{кд}} + K_{i,\text{м}} + K_{i,\text{э}} + K_{i,\text{нм}}.$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве расчетного примера рассмотрена схема расположения узловых точек (рис. 2), при условии: напряжений U_{S1} = 121 кВ и U_{S2} = 10,5 кВ, максимальных полных мощностей подключения S_{S1} = 50 МВА и S_{S2} = 15 МВА, УП2 расположен на расстоянии от УП1 61 км.

Каждый из узлов нагрузки характеризуется:

- максимальной полной мощностью S_{L1} = 10 МВА, S_{L2} = 25 МВА, S_{L3} = 20 МВА;

- коэффициентом мощности $\cos\varphi_{L1}$ = 0,9, $\cos\varphi_{L2}$ = 0,88, $\cos\varphi_{L3}$ = 0,85;
- расположением по абсциссе x_{L1} = 15 км, x_{L2} = 34 км, x_{L3} = 27 км;
- расположением по ординате y_{L1} = 22 км, y_{L2} = 13 км, y_{L3} = 14 км;
- процентом потребителей I категории $S^*_{L1,I}$ = 20 %, $S^*_{L2,I}$ = 10 %, $S^*_{L3,I}$ = 7 %.

Выбрано четыре расчетные схемы: закольцованная (рис. 3), магистральная проходная (рис. 4), магистрально-радиальная (рис. 7) и магистральная с ответвлениями (рис. 8).

Каждая из схем отвечает условиям электроснабжения потребителей I категории от двух независимых узлов. При этом распределенная генерация [16, 17] в учет не принимается, т.к. ее мощность традиционно незначительна, а степень надежности в большинстве случаев оценить крайне сложно.

Общее количество баллов (табл. 3) показало, что закольцованная схема является наилучшей. Действительно, опыт проектирования ЭС предусматривает создание закольцованных сетей, которые способны обеспечить наивысший уровень надежности электроснабжения за счет наличия для каждого группового потребителя двух линий от двух независимых сторон и отдельных узлов питания.

Таблица 3[1].

Таблица итоговых оценок вариантов схем ЭС

№	Тип схемы (Scheme type)	Количество баллов (Total points)						
		за длину (for length)			за массу (for mass)	за КПД (for efficiency)	за надежность (for reliability)	**общая (overall)**
		общая (total)	соотношения (ratio)	комплексная (complex)				
1	Закольцованная (looped)	0,76	1	1,76	0,69	0,993	1	**4,44**
2	Магистральная проходная (trunk passage)	0,98	0,67	1,65	0,67	0,993	0,65	**3,96**
3	Магистрально-радиальная (trunk-radial)	0,74	0,71	1,45	0,74	0,985	0,87	**4,05**
4	Магистральная с ответвлениями (trunk with branch)	1	0,12	1,12	1	1	0,63	**3,75**

В то же время наихудший результат показала магистральная с ответвлениями схема, при этом она является наилучшей по критериям: общей протяженности ЛЭП, массы проводов и КПД. Ее низкий общий результат связан с крайне низкой надежностью, которую можно увеличить. Для этого следует для магистральных схем с ответвлениями использовать двухцепные линии, впрочем, их следует использовать и для магистральной проходной схемы, и для магистрально-радиальной схемы, т.к. и их показатель надежности имеет низкое значение. А при переходе к двухцепным линиям распределение мест в итоговой таблице может существенно поменяться.

Так же следует отметить, что с энергетической точки зрения наилучшей является магистральная схема с ответвлениями, а разброс КПД линий электроснабжения для всех схем не превышает 1,5 %.

Наибольший разброс оценок имеет место для составляющей оценки за длину (по соотношению напряжений), который достигает 88 %, хотя уже в комплексной оценке за длину оценки находятся в диапазоне 37 %.

В целом значительный разброс оценок говорит об особенностях применения той или иной схемы или необходимости применения определенных технических решений, направленных на повышение соответствующей оценки.

Преимущество же закольцованной схемы примерно в 9 % от ближайшего варианта свидетельствует о значительной обоснованности полученного результата при заданных условиях и выбранном типе ЛЭП.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод относительных

[1] см. Appendix 1

сравнительных оценок максимально просто и объективно позволяет оценить оптимальный вариант схемы ЭС для произвольного варианта объектов электроснабжения. Он полностью лишен субъективизма, характерного для существующих методик оценки уровня оптимальности ЭС. Это достигнуто за счет предложенной совокупности и вида частных критериев оптимизации.

Применение предложенного метода показало, что оптимальной структурой для типовой локальной одноцепной ЭС является закольцованная схема. Она опережает по итоговой относительной сравнительной оценке другие варианты схем на 8,8…15,5 %.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

Fig. 1. The structure of a total assessment of a power network scheme variant. (1. Total assessment. 1.1. Complex assessment of length of the power lines. 1.1.1. Assessment of total length of the power lines. 1.1.2. Assessment of total length ratio of the power lines of conventionally high and low voltage. 1.2. Assessment of power lines wires mass. 1.3. Assessment of reliability of power supply. 1.4. Energy assessment of power lines).

Fig. 2. The conventional layout of the power supply elements (*SN*1 & *SN*2 - supply nodes. *LN*1, *LN*2 & *LN*3 - load nodes).

Fig. 3. The looped power network diagram.

Fig. 4. The trunk passage power network diagram.

Fig. 5. The multilooped power network diagram.

Fig. 6. The separate radial power network diagram.

Fig. 7. The trunk-radial power network diagram.

Fig. 8. The power network diagram of trunk with branch.

Table 1. A comparative table of a particular criterion.

Table 2. A total comparative table.

Table 3. The table of total assessments of the variants of the power network schemes.

Литература (References)

[1] Albert R., Albert I., Nakarado G. L. Structural vulnerability of the North American power grid. *Physical Review E*, 2004, vol. 69, no. 2, Available at: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.69.025103 (accessed 15.01.2019). doi: 10.1103/PhysRevE.69.025103.

[2] Sathsara Abeysinghe, Jianzhong Wu, Mahesh Sooriyabandara, Muditha Abeysekera, Tao Xu, Chengshan Wang Topological properties of medium voltage electricity distribution Networks. *Applied Energy*, 2018, vol. 210, pp. 1101-1112. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.113.

[3] Barakou F, Koukoula D, Hatziargyriou N, Dimeas A. Fractal geometry for distribution grid topologies. *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*; 2015. pp. 1-6. doi: 10.1109/PTC.2015.7232496

[4] Rosas-Casals M., Valverde S., Sole R.V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. *International journal of bifurcation and chaos*, 2007, vol. 17, No. 7, pp. 2465-2475.

[5] Chen H., Wang Z., Yan H., Zou H., and Luo B. Integrated planning of distribution systems with distributed generation and demand side response. *Energy Procedia, The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE*, 2015, vol. 75, pp. 981-986. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.314.

[6] Shaalan A. M. Essential aspects of power system planning in developing countries. *Journal of King Saud, Engineering Science*, 2011, vol. 23, No. 1, pp. 27-32. doi: 10.1016/j.jksues.2009.12.002.

[7] Makrushin S.V. Analiz struktury magistral'nykh elektrosetey Rossii: otsenka primenimosti modeli tesnogo mira [Analysis of structure of the power transmission grid in Russia: evaluation of the small world model applicability]. *Upravlenie bolshimi sistemami - Big System Control*, 2017, no. 65, pp. 87-117. (In Russian).

[8] Gerkusov A.A. Optimizatsiya poter' elektroenergii, peredavaemoy po vozdushnym liniyam napryazheniem 110 kv i vyshe [Optimization of the losses of electrical energy passed by air lines with voltage 110 kV and more]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta-Scientific Technical Bulletin of Sankt-Petersburg State Polytechnic University*, 2015, no.1, pp. 89-96. (In Russian). doi: 10.5862.JEST.214.10.

[9] Grahn E., Ström L., Alvehag K., Wallnerström C. J., Öhling L.W. and Johansson T. Incentivizing continuity of supply in Sweden. *Submitted to the 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2016. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7514734 (accessed 15.01.2019). doi: 10.1109/EEM.2016.7521213.

[10] Crucitti P., Latora V. and Marchiori M. Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. *Fluctuation and Noise Letters, World Scientific Publishing Company*, 2005, vol. 5, No 2, pp. L201-L208. doi: 10.1142/S0219477505002562.

[11] Popova O.M., Usov I.Yu. Algoritmy uproshchennogo analiza nadyozhnosti pri optimizatsii sistemoobrazuyushchey seti [Algorithms of simplified analyze of reliability for power grid optimization]. *Problemy upravleniya - Control Sciences*, 2014, no. 2, pp. 49-55. (In Russian).

[12] Hines P., Blumsack S., Sanchez E. C., Barrows C. The topological and electrical structure of power grids. *Proc. of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences - 2010*, Jan. 2010, pp. 1-10. doi: 10.1109/HICSS.2010.398.

[13] Matveev V.N., Varnavskiy K.A. Strukturnyy analiz pitayushchikh system elektrosnabzheniya sibirskogo regiona [Structural analyze of power

supply systems of Siberia]. *Vestnik KuzGTU - Bulletin of KuzSTU*, 2012, no. 3, pp. 152-155. (In Russian).

[14] Liang Zhao, Tianyang Mao, Wen Xu, Jingzhao Luan, Jiangning Wu, Guangyuan Qi A review of risk assessment methods for power system. *ICMITE 2017. MATEC Web of Conferences*, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201713900175.

[15] Crucitti P., Latorab V., Marchiori M. A topological analysis of the Italian electric power grid. *Physica A*, 2004, vol. 338, pp. 92-97. doi: 10.1016/j.physa.2004.02.029.

[16] Khan U.N. Distributed generation and power quality. *International Conference on Environment and Electrical Engineering, Karpacz, Poland*, 2009, vol. 145, pp. 232-235.

[17] Khan U. N. Impact of distributed generation on distributed network, *University of Technology, Wroclaw*, 2008. Available at: http://www.dwm.pwr.wroc.pl (accessed 15.01.2019).

[18] Jahangiri P., Fotuhi-Firuzabad M. Reliability assessment of distribution system with distributed generation. *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, Johor Baharu, Malaysia, December 1-3, 2008, pp. 1551-1556. doi: 10.1109/PECON.2008.4762728.

[19] Ciriaco A., Zarrouk S., Zakeri G. Probabilistic resource assessment using experimental design and second order proxy model: Rotorua geothermal system, New Zealand. *Proceedings 40th New Zealand Geothermal Workshop 14-16 November 2018 Taupo, New Zealand*, 2018. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Sadiq_Zarrouk/publication/328928552_Probabilistic_Resource_Assessment_Using_Experimental_Design_and_Second_Order_Proxy_Model_Rotorua_Geothermal_System_New_Zealand/links/5bebef05299bf1124fd127c9/Probabilistic-Resource-Assessment-Using-Experimental-Design-and-Second-Order-Proxy-Model-Rotorua-Geothermal-System-New-Zealand.pdf?origin=publication_detail (accessed 15.01.2019).

[20] Kolpakhch'yan P.G., Lobov B.N., Al Dzhurni Ragkhad, Gummel A.A. Analiz struktury fotoelektricheskoy sistemy [Analyze of photoelectric system structure]. *Izvestiya vuzov. Severokavkazskiy region - Proceedings of academy. North Caucasia Region*, 2014, no. 6, pp. 44-47. (In Russian).

[21] Varganova A.V. O metodakh optimizatsii rezhimov raboty elektroenergeticheskikh system i setey [About optimization methods of power supply system and network modes]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika" - Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76-85. (In Russian). doi: 10.14529/power170309.

[22] Zheng Fu-Min, Ma Li, Liu Nian, Chen Jin-Shan Assessment for distribution network planning schemes of urban electric power system. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 1067-1074. doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1056.

[23] Qi Y., Wen F., Wang K., Li L., Singh S. A fuzzy comprehensive evaluation and entropy weight decision-making based method for power network structure assessment. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2010, vol. 2, No. 5, pp. 92-99.

[24] Al-Wakeel A., Wu J., JenkinsN. *K*-means based load estimation of domestic smart meter measurements. *Applied Energy*, 2017, vol. 194, pp. 333-342. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.046.

[25] Yan Xu, Zhao Yang Dong, Chixin Xiao, Rui Zhang, Kit Po Wong Optimal placement of static compensators for multi-objective voltage stability enhancement of power systems. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, Vol. 9, Iss. 15, pp. 2144-2151. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0070.

[26] Teeuwsen S.P., Fischer A., Erlich I., El-Sharkawi M.A. Assessment of the small signal stability of the European interconnected electric power system using neural networks, *LESCOPE 2001, Halifax, Canada*, June 2001, pp. 158-161. doi: 10.1109/LESCPE.2001.941643.

[27] Popova O.M., Usov I.Yu. Optimizatsiya razvitiya sistemoobrazuyushchey seti s pomoshch'yu geoinformatsionnyh tehnologiy [Optimization of the development of power grid using the geoinformation technology]. *Problemy upravleniya - Control Sciences*, 2010, no. 4, pp. 66-73. (In Russian).

[28] Kimstach O.Yu., Yermolenko V.E. Metod porivnyal'nykh otsinok dlya vyboru optimal'noy struktury elektroenergetychnoy systemy [Comparative assessments method for choosing of optimal structure of electrical power system]. *Sciences of Europe*, 2018, vol. 1, no. 23, pp. 63-69. (In Ukrainian).

Сведения об авторе.

Кимстач Олег Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры Судовых электроэнергетических систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова. Область научных интересов: электрические машины, автономная и стационарная электроэнергетика, методы и средства оптимального проектирования.
E-mail: oleg.kimstach@nuos.edu.ua

The Use of Chokes to Improve the Quality of the Static Frequency Converter

Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Golub I.V., Tirshu M.C.
Institute of Power Engineering
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The aim of the work is to develop technical measures to improve the quality of the power transmission process through electrical link, which contains a frequency converter based on a PST (phase-shifting transformer) with circular rotation of the output voltage phase in relation to the input, made according to the triangle scheme and controlled by means of power electronics. To achieve this goal, the use of longitudinal inductive elements (chokes) has been proposed as one of the measures that significantly improves the controlled mode parameters in the process of frequency conversion. The problem has been solved by performing computational experiments on simulation models of electrical links, combining two power systems with a frequency of 60 and 50 Hz, respectively. The structure of electrical links at various stages of the study has included several circuit variants of a frequency converter (single-channel circuit, dual-channel with reversing control winding sections, dual-channel circuit without reversing control winding sections) and has developed by authors earlier. In the process of research, the value of inductance of chokes has been changed, as well as their place of connection. The controlled transmission's characteristics have been analyzed as well. The novelty of the work lies in the use of longitudinally included inductive elements as a possible solution to the problem of improving the quality of power transmission when combining power systems with different operating frequencies using static frequency converters. The optimal values of the parameters of inductive elements, comprised between 0.03-0.035Hn for all circuit versions of the converter, have been identified.
Keywords: interconnection, FACTS – controller, static frequency converter, phase-shifting transformer, choke, active power deviation, total harmonic distortion.
DOI: 10.5281/zenodo.2650950

Utilizarea inductoarelor pentru îmbunătăţirea calităţii convertorului de frecvenţă statică

Calinin L.P., Zaiţev D.A., Golub I.V., Tîrşu M.C.
Institutul de Energetică
Chişinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul lucrării constă în elaborarea unor măsuri tehnice de sporire a calităţii procesului de transmitere a energiei prin conexiuni electrice, care conţin un convertizor de frecvenţă bazat pe utilizarea unui transformator cu reglarea diferenţei de fază (TRDF) cu rotirea circulară a vectorului tensiunii de ieşire în raport cu vectorul tensiunii de intrare şi argumentarea unor noi soluţii tehnice de realizare a acestui regim de funcţionare. TRDF are la bază schema conexiunii înfăşurărilor de tip triunghi şi este comandat, utilizând dispositive ale electronicii de putere. Pentru atingerea acestui obiectiv, se propune utilizarea elementelor inductive longitudinale (bobine de inductanţă) ca una dintre măsurile, care îmbunătăţesc esenţial regimurile de funcţionare în procesul reglării frecvenţei. Problema s-a rezolvată prin efectuarea experimentelor computaţionale pe modele de simulare a interconexiunilor electrice, care descriu două sisteme energetice la frecvenţă de 60 şi la 50 Hz. Structura examinată a inclus mai multe variante a schenei de realizarea a convertorului (schema cu un canal, cu dublu canal cu schimbarea schemei de conrexiune a secţiunilor înfăşurării de dirijare, cu dublu canal şi algoritmul de comutare fără schimbarea poziăionării terminalelor secţiilor), care anterior au fost elaborate de autorii prezentei lucrări. Investigaţiile au fost realizate pentru diferite valori a inductanţei, locului lor de conexiune în circuit. S-au analizat caracteristicile de transmisie a puterii vehiculate. Noutatea ştiinţifică a lucrării constă în utilizarea elementelor inductive longitudinale, în calitate de soluţie posibilă pentru sporirea calităţii procesului de transmisie a puterii la interconectarea sistemelor electroenergetice, care funcţionează la diferite standarde de menţinere a frecvenţei cu ajutorul convertoarelor statice de frecvenţă.
Cuvinte-cheie: interconexiune dintre sisteme energetic, convertor static de frecvenţă, bobine de inductanţă, deviere de putere activă, coeficient de distorsiune neliniară.

© Калинин Л.П., Зайцев Д.А.,
Голуб И.В., Тыршу М.С., 2019

Применение дросселей для повышения качества работы статического преобразователя частоты

Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Голуб И.В., Тыршу М. С.
Институт энергетики
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Объектом исследования является устройство FACTS - контроллер (Flexible **a**lternating current transmission systems), созданный на базе статического трансформаторного частотного преобразователя, который может быть использован для объединения параллельно работающих энергосистем, имеющих различные рабочие частоты, либо стандарты по поддержанию частоты. Целью работы является разработка технических мероприятий, позволяющих повысить качество процесса передачи мощности по электрической связи**,** содержащей частотный преобразователь на основе ФПТ (фазоповоротный трансформатор) с круговым вращением фазы выходного напряжения относительно входного, выполненного по схеме треугольник и управляемого средствами силовой электроники, а также поиск технических решений. Для достижения поставленной цели предложено применение продольных индуктивных элементов (дросселей) в качестве одной из мер, существенно улучшающей контролируемые режимные параметры в процессе преобразования частоты. Задача была решена посредством проведения расчетных экспериментов на имитационных моделях электрической связи, объединяющей две энергосистемы с частотой 60 и 50 Гц соответственно. В состав электрической связи на различных этапах исследования входили несколько схемных вариантов частотного преобразователя (одноканальная схема, двухканальная с применением реверсирования секций обмотки управления, двухканальная схема с безреверсной технологией переключения), разработанные авторами ранее. В процессе исследования изменялась величина индуктивности дросселей, место их подключения, также проанализированы контролируемые характеристики передачи. Новизна работы заключается в применении продольно включаемых индуктивных элементов в качестве возможного решения проблемы повышения качества передачи мощности при объединении энергосистем с различной рабочей частотой с помощью статических преобразователей частоты. Показано влияние продольно включаемых в передачу дросселей на качественные характеристики преобразования по мощности и частоте. Найдены оптимальные значения параметров индуктивных элементов, которые составляют 0,03-0,035Гн для всех схемных вариантов преобразователя.

Ключевые слова: межсистемная связь, FACTS – контроллер, статический преобразователь частоты, фазоповоротный трансформатор, дроссель, девиация активной мощности, коэффициент нелинейного искажения.

Введение

Существенное значение при объединении энергосистем с различной рабочей частотой или стандартами по поддержанию рабочей частоты имеют FACTS – контроллеры [1-4], позволяющие обеспечить качественный процесс преобразования/согласования частоты. В настоящее время развитие получили два основных направления такого рода технологий:

1. Преобразование на постоянном токе (HVDC [5-13], back-to- back [14]). К основным достоинствам этой технологии можно отнести универсальность и быстродействие с точки зрения управления перетоками мощности, а также возможность передачи большей мощности по сравнению с передачей на переменном токе. Минусом преобразователя HVDC является необходимость двойного преобразования энергии (выпрямление и инвертирование) как на передающей, так и на приемной стороне. Это приводит к гармоническим искажениям синусоид рабочих токов и напряжений, что в свою очередь, требует применения сложных фильтро-компенсирующих устройств.

2. Преобразование на переменном токе (VFT-voltage frequency transformer [15-19], ASEFC или АСЭМПЧ -асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (asynchronized synchronous electromechanical frequency converter [20-27])). Основное достоинство поворотного трансформатора VFT состоит в том, что при любой кратности преобразования частоты рабочие напряжения и токи на его выходных клеммах всегда остаются строго синусоидальными. К недостаткам можно отнести:

-необходимость применения скользящих (щеточных) токосъемных контактов, что приводит к снижению надежности функционирования установки;

-дополнительное (помимо собственных электрических потерь) расходование энергии на управление, связанное с необходимостью поддержания заданного уровня обменной мощности между системами за счет создания

соответствующего вращающего момента сервомотора;

-наличие механической инерционности ротора, сопровождающееся появлением электромеханических переходных процессов, что является дополнительным фактором негативного влияния на точность регулирования и стабилизации уровня передаваемой мощности;

-наличие воздушного зазора между обмотками статора и ротора связано со значительным повышением тока холостого хода устройства до величины, соизмеримой с током нагрузки. Следует также отметить, что использование VFT влечет за собой увеличение продольного индуктивного сопротивления соответствующего тракта электропередачи и вызываемую этим необходимость применения специальных компенсирующих устройств в целях поддержания заданного напряжения по концам линии.

Разработка альтернативных, относительно VFT и HVDC, технических средств преобразования частоты для электрических систем позволит повысить степень управляемости транспортных и распределительных сетей, что является характерной тенденцией современного этапа развития электроэнергетики.

В работе исследованы параметры режима электрической связи, содержащей конвертор частоты, реализующий новую технологию преобразования на основе статического трансформаторного устройства с круговым вращением фазы, причем, предлагаемое техническое решение позволяет избавиться от недостатков, отмеченных в перечисленных ранее работах, а также может оказаться дешевле.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Задача исследования состояла в поиске технических решений, позволяющих усовершенствовать процесс преобразования в электрической связи, объединяющей две энергосистемы с частотой 60 и 50 Гц.

В процессе достижения цели был проведен комплекс расчетных экспериментов на основе разработанных стуктурно-имитационных моделей.

В рамках решения поставленной задачи предложено применение продольных индуктивных элементов (дросселей) в качестве одной из мер, улучшающей контролируемые режимные параметры в процессе преобразования частоты. Расчетные эксперименты проводились исходя из следующих условий:

- напряжение передающей системы $U_S = 230V$, частота $f_s = 60Hz$;
- напряжение приемной системы $U_R = 230V$, частота $f_r = 50Hz$;
- активная мощность передавалась в направлении от энергосистемы S к энергосистеме R;
- передающая S и приемная R энергосистемы представлены в моделях как шины бесконечной мощности, т.е. $U_S = U_R = const$;
- уровень передаваемой активной мощности поддерживался на постоянном уровне 4500Вт ±10% за счет корректировки угла между передающей и приемной системой;
- допустимый угол по передаче ограничен величиной $\psi = 60^\circ$;
- параметры имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя;
- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- контролируемыми режимными характеристиками являлись: величина девиации активной мощности $(\partial P_S, \partial P_R)$ и коэффициенты нелинейных искажений токов $(THD(I_S), THD(I_R))$ на передающей S и приемной R системах;
- дроссели устанавливались в электропередачу на стороне приемной системы;

II. СХЕМНЫЕ ВАРИАНТЫ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.

В состав электрической связи на различных этапах моделирования входили несколько схемных вариантов частотного преобразователя (одноканальная схема, двухканальная с применением реверсирования секций обмотки управления, двухканальная схема без реверсирования системы управления). Принципиальная схема одноканального преобразователя, для

построения имитационной модели, представлена на рис.1.

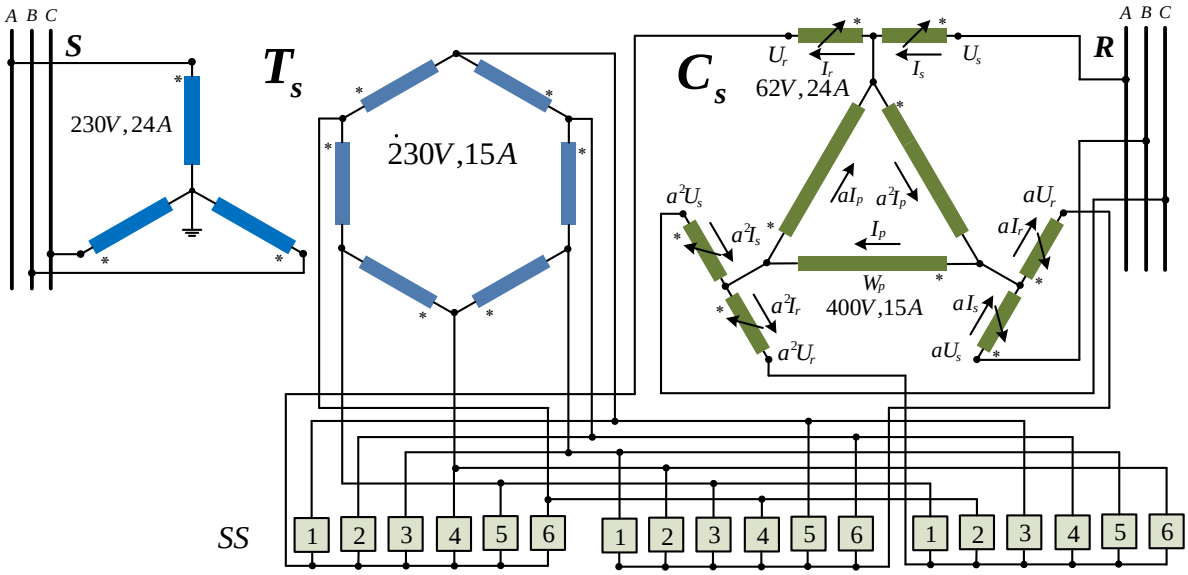


Рис.1. Схема одноканального преобразователя частоты[1].

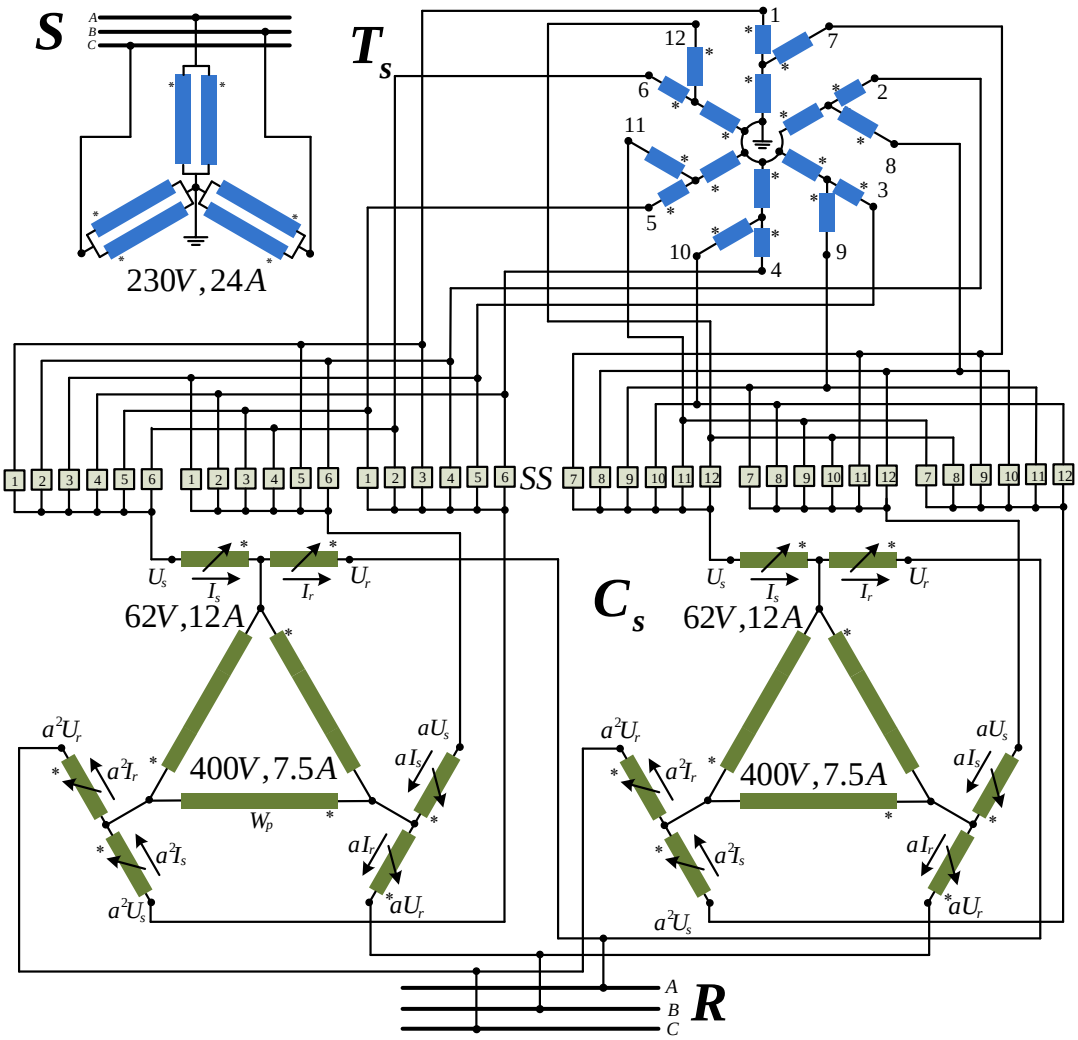


Рис.2. Схема двухканального преобразователя частоты с применением реверсирования секций обмотки управления[2].

[1,2] Appendix 1

С целью улучшения качества частотного преобразования была предложена идея двухканального 24-позиционного преобразователя на базе 6-и фазного трансформатора, выполненного по схеме «звезда» и обеспечивающего поддерживаемый между каналами 30° фазовый сдвиг. По каждому каналу осуществляется симметричное регулирование. Работа двухканального преобразователя моделировалась в двух вариантах переключения обмоток управления. Схема преобразователя с реверсированием секций обмотки управления, представлена на рис.2, а без реверсирования - на рис.3.

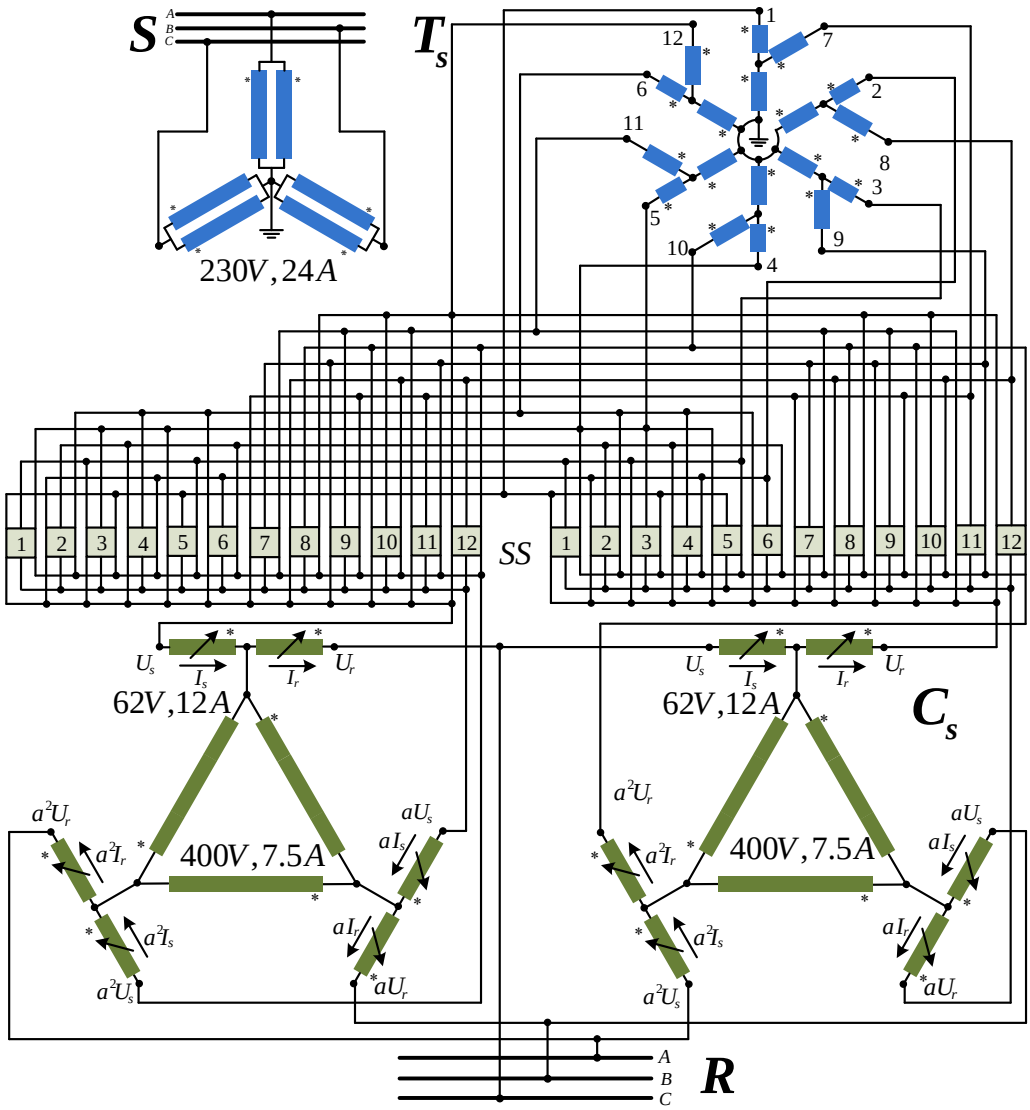


Рис.3. Схема двухканального преобразователя частоты без реверсирования секций обмотки управления[3].

Преобразователь рис.3 имеет на 12 силовых ключей грубого регулирования больше и на 24 силовых ключа тонкого регулирования меньше по сравнению со схемным вариантом, рис.2. Следует отметить, что и в первом и во втором случае, суммарная мощность ключей грубого регулирования остается неизменной.

Управление режимом переключения осуществляется двумя элементами:

- блоком грубого регулирования (*SS*);

Блок грубого регулирования обеспечивает разделение окружности преобразования на шесть секторов (размерностью 60° в каждом), в пределах которых оперирует блок тонкого регулирования.

- блоком тонкого регулирования.

[3] Appendix 1

Блок тонкого регулирования преобразователя представляет собой управляемый фазорегулирующий трансформатор C_s, содержащий в каждой фазе соединенные в треугольник нерегулируемые рабочие обмотки и две одинаковые, последовательно соединенные обмотки управления, подключаемые средней точкой их соединения к вершинам треугольника. Обмотки управления секционированы и обеспечивают ступенчатое регулирование фазового сдвига на выходе блока тонкого регулирования

Переключение секций рабочих обмоток обеспечивает ступенчатое изменение угла фазового сдвига напряжения на выходе по отношению к приложенному напряжению в пределах от 0 до 360 градусов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Схема проведения эксперимента для исследуемых схемных вариантов преобразователей представлена на рис.4.

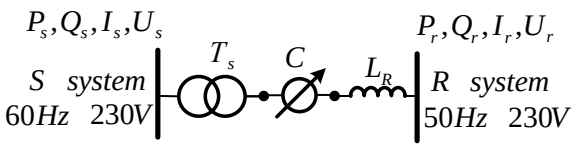


Рис.4. Схема проведения эксперимента[4].

Для выяснения влияния величины индуктивности дросселя на качество процесса преобразования при согласовании частоты в процессе моделирования изменялась величина индуктивности дросселей, подключаемых со стороны приемной системы.

Зависимости контролируемых режимных параметров от величины индуктивности подключаемого дросселя (L_R) приведены на рис.5-8 для рассматриваемых схемных вариантов преобразователей:

1. одноканального;
2. двухканального с реверсированием секций обмотки управления;
3. двухканального без реверсирования секций обмотки управления.

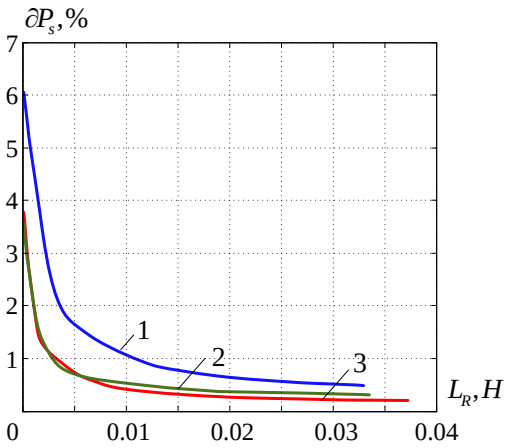


Рис.5. Степень колебательности активной мощности на шинах передающей системы[5].

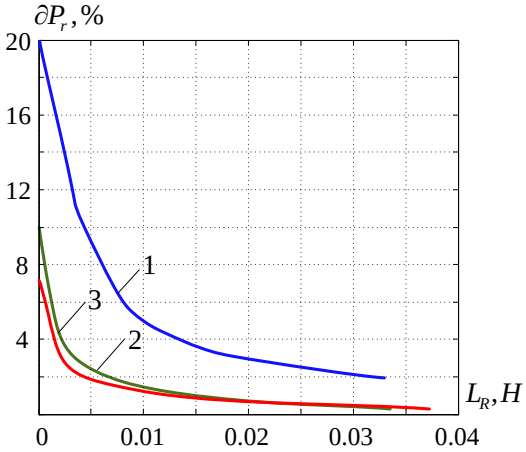


Рис.6. Степень колебательности активной мощности на шинах приемной системы[6].

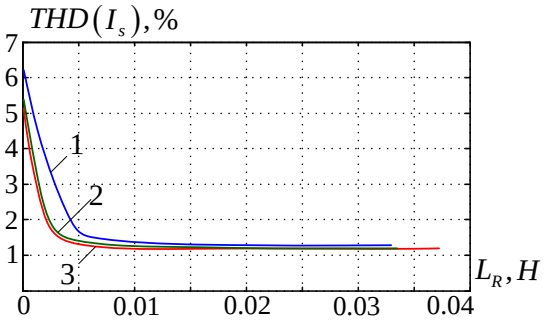


Рис.7. Коэффициент нелинейного искажения тока на шинах передающей системы[7].

[4,5,6,7] Appendix 1

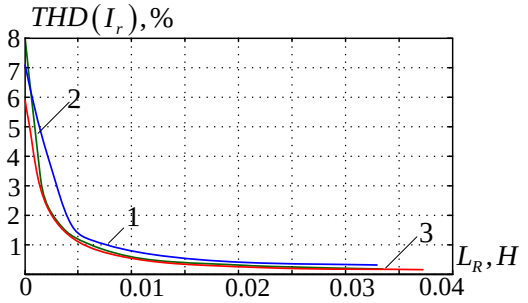


Рис.8. Коэффициент нелинейного искажения тока на шинах приемной системы[8].

Представленные зависимости иллюстрируют преимущество двухканальной безреверсной схемы с точки зрения качества режимных параметров.

Изменение величины индуктивности дросселя от 0 до 0,35 позволяет улучшить контролируемые величины:

- коэффициент нелинейного искажения тока на передающей системе $THD(I_s)$ для схем двухканального преобразователя на 0,08% ниже, чем для одноканального преобразователя;
- коэффициент нелинейного искажения тока на приемной системе $THD(I_r)$ для двухканального преобразователя с реверсированием и без реверсирования секций обмотки управления на 0,13% и 0,17% ниже, чем для одноканального преобразователя;
- величина девиации активной мощности на передающей системе ∂P_s для одноканального преобразователя практически в два раза выше, чем для вариантов преобразователей в двухканальном исполнении и составляет 0,49%;
- девиация активной мощности на приемной системе ∂P_r для двухканальных преобразователей существенно лучше (почти в десять раз), чем для одноканального преобразователя.

Представленные зависимости (рис.5-8) позволили определить значения индуктивностей дросселей, обеспечивающие наилучшие характеристики передачи:

- для 1-го варианта $L = 0.033 Гн$;
- для 2-го варианта $L = 0.034 Гн$;
- для 3-го варианта $L = 0.037 Гн$.

Гистограммы, иллюстрирующие соотношение контролируемых параметров режима преобразования для выбранных дросселей, приведены на рис. 9-10.

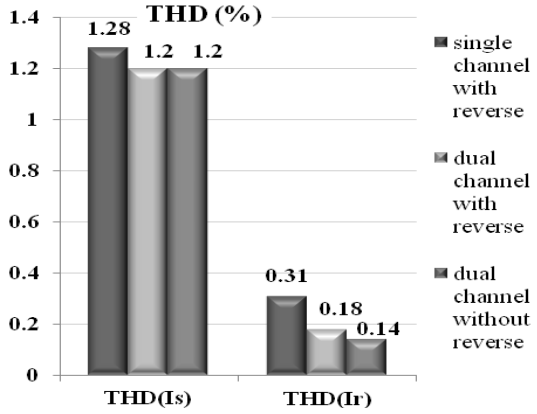


Рис.9. Коэффициенты нелинейного искажения токов на передающей и принимающей системах[9].

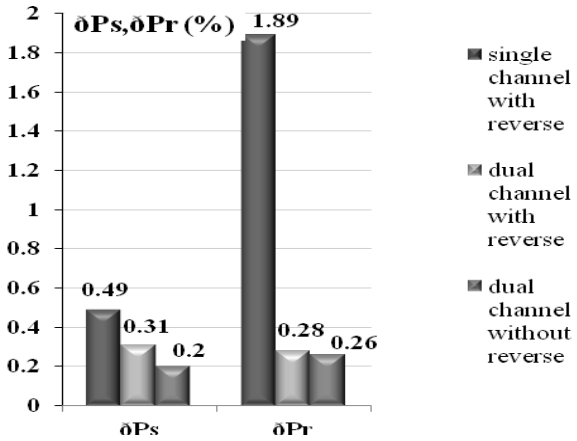


Рис.10 Девиация активной мощности на передающей и принимающей системах[10].

Приведенные на рис.9,10 данные позволяют сделать вывод о соответствии контролируемых характеристик режима стандарту IEEE-519-2014.

Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. для рассматриваемых схемных вариантов отмечен положительный эффект, получаемый за счет включения в передачу индуктивных элементов (дросселей) на качественные характеристики преобразования по мощности и частоте;
2. определены значения индуктивности дросселей, находящиеся в диапазоне 0,03-0,035Гн, обеспечивающие оптимальные характеристики передачи;
3. показана эффективность применения двухканальных схем преобразования для

[8,9,10] Appendix 1

повышения качества режимных параметров передачи.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

[1]**Fig. 1** Single-channel frequency converter scheme.

[2]**Fig. 2** Scheme of a dual channel frequency converter with reversing of the sections control winding.

[3]**Fig. 3** Scheme of a dual channel frequency converter without reversing the control sections winding.

[4]**Fig. 4** Scheme of the experiment.

[5]**Fig. 5** Active power deviation on sending system tires.

[6]**Fig. 6** Active power deviation on receiving system tires.

[7]**Fig. 7** Coefficient of total harmonic distortion on the tires of the sending system

[8]**Fig. 8** Coefficient of total harmonic distortion on the tires of the receiving system

[9]**Fig. 9** Total harmonic distortion coefficients on the sending and receiving systems

[10]**Fig. 10** Deviation of active power on the sending and receiving systems.

Литература (References)

[1] Rajiv K. Varma. Introduction to FACTS Controllers. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 15-18 March 2009

[2] Fang Z. Peng, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid. Proceedings of the IEEE Year: 2017, Volume: 105, Issue: 11 Pages: 2099-2115.

[3] Grünbaum R., Petersson Å., and Thorvaldsson B., “FACTS, improving the performance of electrical grids,” ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.

[4] Zhenhua Zhang, Multi-function Integrated FACTS Devices and its Application in the Development of Smart Grid 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering Year: 2010 Pages: 5349-5352.

[5] Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien. Improvement on energy trade capacity for asynchronous power system by application of hybrid multi-infeed direct current transmission system *IEEE URUCON*, Montevideo, 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/URUCON.2017.8171853.

[6] Long W.F.; Litzenberger W. Fundamental concepts in High-Voltage Direct-Current power transmission. PES T&D 2012, Orlando, FL, 2012, pp. 1-2. doi: 10.1109/TDC.2012.6281596.

[7] Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien Modeling, Simulation and Application of Modular Multilevel Converter in Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp.1-5. doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511758.

[8] Khan Fida Muhammad; Abbasi Ayesha; Khan Muhammad Azam; Imran Muhammad. General overview of using High Voltage Direct Current (HVDC) transmission in Pakistan for maximum efficiency and. 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET) pp.1–5 doi:10.1109/PGSRET.2015.7312221.

[9] Yousif Hakam Muayad; Vural Ahmet Mete Modeling of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system. 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE) 2017 pp. 43–51 doi: 10.1109/ICEEE2.2017.7935790.

[10] Zmaznov Eugeny; Lozinova Natalya; Suslova Olga; Andreev Mikhail; Ufa Ruslan. HVDC LCC technology and power quality issues in cross-border electrical power transmission Russia — Finland. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). 2018 doi 10.1109/ISGTEurope.2018.8571805.

[11] Flourentzou Nikolas; Agelidis Vassilios G. Georgios; Demetriades D. VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics. (Volume: 24,Issue: 3, March 2009) pp: 592–602 doi: 10.1109/TPEL.2008.2008441.

[12] Kala Meah; Sadrul Ula. Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting pp: 1 – 5 doi**:**10.1109/PES.2007.385993.

[13] Balyberdin L. L. i dr. Uvelichenie moshchnosti ehlektroperedachi 330/400 kV s vstavkoj postoyannogo toka mezhdu ehnergosistemami Rossii i Finlyandii.[Increasing the power of 330 / 400kV transmission with a back-to-back HVDC converter station between the power systems of Russia and Finland] EHlektricheskie stancii, 2004, № 10.pp. 50-54. (In Russian).

[14] Khan Rizwan M.; Iqbal Atif; Farhad Ilahi. Digital simulation of variable frequency transformer. Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. pp:1–6 doi**:**10.1109/PEDES.2010.5712376.

[15] Merkhouf A.; Upadhyay S; Doyon P. Variable frequency transformer-an overview. Conference: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE doi**:** 10.1109/PES.2006.1709639.

[16] Nadeau Denis. A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec TransÉnergie Network - The Behavior during Disturbance. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, pp. 1-5. doi: 10.1109/PES.2007.385584.

[17] Ilahi Bakhsh Farhad; Mohammad Irshad; Jamil Asghar M. S. Modeling and simulation of

variable frequency transformer for power transfer in-between power system networks. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010) pp: 1-7.

[18] Rahul R.; Jain Amit Kumar; Bhide Ravindra. Analysis of variable frequency transformer used in power transfer between asynchronous grids. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2012 pp: 1 – 5.

[19] Zelenohat N.I., Aristov I.S. Analiz staticheskoj ustojchivosti ehnergosistem pri nalichii gibkih mezhsistemnyh svyazej s preobrazovatelyami chastoty. [Analysis of static stability of power systems in the presence of flexible interconnections with frequency converters] EHnergetik Izdatel'stvo: Nauchno-tekhnicheskaya firma "EHnergoprogress" (Moskva) 2011, No:4 pp: 27-30. (In Russian).

[20] Demidova M.V., Semina I.A., Babich N.A. Asinhronizirovannyj sinhronnyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized synchronous electromechanical frequency converter]. Aktual'nye voprosy ehnergetiki materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2017 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 346-348 (In Russian).

[21] Prokopenko S.A. Asinhronizirovannyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized electromechanical frequency converter] Aktual'nye voprosy ehnergetiki. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov. 2016 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 168-172. (In Russian).

[22] Janda Žarko S. Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"2004, br. 16, str. 33-46.

[23] Denboer1 N.; Karawita1 C.; Mohaddes M. Frequency scan based screening technique for harmonic interactions of HVDC systems. 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017) doi:10.1049/cp.2017.0035.

[24] Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshih garmonik v ehlektricheskih setyah vysokogo napryazheniya. [Reducing the level of higher harmonics in electric networks of high voltage]. Vestnik IrGTU 2014, №4 (87), pp.143-146. (In Russian).

[25] Osipov D.A. Sposoby podavleniya garmonik v sistemah ehlektrosnabzheniya. [Ways to suppress harmonics in power supply system's] Mezhdunarodnaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh Prospekt svobodnyj-2016, Krasnoyarsk, Si'irskij federal'nyj Universitet, 15-25 aprelya 2016. pp.49-52. (In Russian).

[26] Amelin A.A. Upravlenie peretokom aktivnoj moshchnosti po neodnorodnoj mezhsistemnoj svyazi v ehnergosisteme. [Control the Active Power Flow on non-uniform intersystem communication in the power system]. Innovacii i investicii (Moskva) 2014, No:5 pp: 167-169 ISSN: 2307-180X. (In Russian).

Сведения об авторах.

Калинин Лев Павлович, Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Область научных интересов связана с разработкой и применением FACTS контроллеров в энерго-системах.
kalinin_lev@ie.asm.md

Тыршу Михаил Степанович Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Научные интересы связаны с диагностикой высоковольт-ного оборудования и силовой электроникой.
tirsu.mihai@gmail.com

Зайцев Дмитрий Александрович, Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Научные интересы лежат в области исследования режимов энергосистем, содержащих гибкие межсистемные связи.
zaiats@ie.asm.md

Голуб Ирина Владимировна, Институт Энергетики АНМ. Область научных интересов: режимы энергосистем, управляемые линии электропередачи переменного тока. irina.golub@mail.ru

New Approach for Voltage Drop Estimation in the Busbars of Workshop Networks at Higher Current Harmonics Influence

Kotsur M.I., Yarymbash D.S., Bezverkhnya Yu.S., Kotsur I.M.
Electrical Engineering Faculty, Zaporizhzhia National Technical University
Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. The presence of higher current harmonics has a negative impact on the efficiency and reliability of the elements of network. Higher current harmonics can lead to significant increases of resistance, voltage drop and active losses in busbar, also to decreasing network power factor. Existing engineering techniques can't provide a reliable calculation of the parameters of busbars at higher current harmonics influences. Therefore, the aim of the work is to develop a new approach of parameters determination and the voltage drop estimation in busbar at higher current harmonics influence. Mathematical model of electromagnetic processes in busbar, which takes into account their design features, non-linearity of magnetic and electrophysical properties, proximity effects, surface and external surface effects, was developed and proposed. This model will allow to determinate the components of active and reactive resistances of busbar, voltage drops for each eigenvalue of the amplitude and frequency of current harmonics. Based on field simulation results was obtained the functional dependence in bicubic polynomial form. For effective spectra and amplitudes of higher harmonics, at selecting the corresponding polynomial coefficients, it will allow to determinate the components and the resulting values of voltage drops for an individual busbar's design without spending time on field simulation. Based on the proposed approach, a method will be developed for the busbar's parameters identification and voltage drop estimation. This will allow effectively define the network configuration, installed capacity of compensating devices, which will provide the reliability of electrical collectors with the declared technical data and etc.
***Keywords*:** busbar, electromagnetic field, model; interpolation, current harmonics, short-circuit ratio.
DOI: 10.5281/zenodo.2650419

O nouă abordare a estimării căderii de tensiune în bara trolley a rețelelor halelor condiționată de armonicelor superioare de curent

Kotsur M.I., Yarymbash DS, Bezverkhnyaya Yu.S., Kotsur I.M.
Facultatea de Inginerie Electrica a Universitatii Tehnice Nationale Zaporizhzhya
Zaporizhia, Ucraina

Rezumat. Prezența armonicilor superioare în sistemele de alimentare cu energie are un impact negativ asupra eficienței și fiabilității elementelor lor. Armonicile superioare conduc la o creștere semnificativă a rezistenței electrice, a căderii de tensiune și a pierderilor în barele trolley, scăderea factorului de putere al rețelei. Metodele cunoscute de calcule inginerești asigura credibilitatea determinării valorilor parametrilor și caracteristicilor barelor trolley, luând în considerare acțiunea armonici superioare de curent din cauza complexității proceselor electromagnetice care apar în aceste bare. Scopul lucrării constă în dezvoltarea unei noi abordări privind determinarea parametrilor barelor trolley și estimarea căderii de tensiune în barele trolley ale fazelor sub acțiunea armonicilor superioare de curent. Pentru a rezolva această problemă s-a elaborat și propus un model matematic al proceselor electromagnetice în barele de trolley, luând în considerare caracteristicile lor constructive, neliniaritatea proprietăților magnetice și electrofizice, efectele de proximitate, efectele de suprafață și cele de suprafață parvenite din exterior, care vor permite determinarea cu precizie ridicată a valorilor componentelor reactivă și reactivă a impedanței barelor trolley și pierderile de putere condiționate de fiecare armonică superioară a curentului, la utilizarea metodelor numerice de calcul. Pe baza rezultatelor modelării distribuției câmpului electromagnetic s-a obținut o relație funcțională sub forma unui polinom bi-cubic, care permite pentru spectrul cunoscut al armonicilor superioare de curent, selectând valorile coeficienților polinomului să se determine valorile căderilor de tensiune pentru barele date fără a consuma timp pentru efectuarea procesului de simulare a câmpurilor electromagnetice.
Cuvinte-cheie: bară de curent, câmp electromagnetic, model, interpolare, armonici de curent; factor de scurtcircuit.

© Kotsur M.I., Yarymbash D.S.,
Berverkhnya Yu.S., Kotsur I.M., 2019

Новый подход к оценке падения напряжения в троллеях шинопровода цеховых сетей в условиях действия высших гармоник тока

Коцур М.И., Ярымбаш Д.С., Безверхняя Ю.С., Коцур И.М.
электротехнический факультет Запорожского национального технического университета
Запорожье, Украина

Аннотация. Наличие высших гармоник в системах электроснабжения, оказывают негативное влияние на эффективность и надежность их элементов. Высшие гармоники могут приводить к существенному увеличению электрических сопротивлений, падению напряжения и потерь в троллеях шинопроводов, снижению коэффициента мощности сети. Существующие инженерные методики не могут обеспечить достоверный расчет параметров и характеристик шинопроводов с учетом действия высших гармоник тока из-за сложных электромагнитных процессов, протекающих в них. Поэтому, целью работы является разработка нового подхода для определения параметров и оценки падения напряжений в троллеях фаз шинопроводов в условиях действия высших гармоник тока. В связи с этим была разработана и предложена математическая модель электромагнитных процессов в троллейных шинопроводах, учитывающая их конструктивные особенности, нелинейность магнитных и электрофизических свойств, эффекты близости, поверхностные и внешние поверхностные эффекты, которая позволит с высокой точностью и эффективностью численной реализации определить составляющие активных и реактивных сопротивлений троллей шинопровода, падений напряжения и потерь мощности в процессе электропередачи для каждого собственного значения амплитуды и частоты гармоники тока. На основании результатов полевого моделирования получена функциональная зависимость в виде бикубического полинома, которая позволит для действующих спектров и амплитуд высших гармоник тока, а также коэффициента короткого замыкания, при выборе соответствующих коэффициентов полинома, определить составляющие и результирующие значения падений напряжения для конкретного шинопровода без затрат времени на полевое моделирование. На основании предложенного подхода будет разработана методика определения параметров шинопровода и оценки потерь напряжения в условиях действия высших гармоник тока. Это позволит эффективно подобрать конфигурацию цеховой сети, определить установленную мощность фильтрующих и компенсирующих устройств, что даст возможность повысить качество и надежность работы электроприемников с заявленными паспортными данными, а также повысить коэффициент мощности сети.

Ключевые слова: шинопровод, электромагнитное поле, модель, интерполяция, гармоники тока; коэффициент короткого замыкания.

I. ВВЕДЕНИЕ

Производство металлургической энергоемкой продукции, обеспечение технологических операций посредством применения подъёмно-транспортных механизмов, в том числе крановых электроприводов в цехах предприятий является весьма энергозатратным. Поэтому, для модернизации собственных энергосистем предприятий металлургической промышленности требуется применение современных решений в области энергоресурсосбережения. Системы цехового электроснабжения должны удовлетворять жестким требованиям высокой надежности, эффективности и безопасности, обеспечивая при этом высокое качество электрической энергии. Современные системы цехового электроснабжения могут иметь значительную протяженность, порядка 700-1000 м и более. Поэтому, их параметры и электрические характеристики оказывают существенное влияние на качество электроэнергии, режимы работы электроприемников и энергоэффективность технологических процессов [1]. Широкое применение силовых полупроводниковых преобразователей во всех отраслях промышленности позволило повысить энергоэффективность промышленных установок, снизить потребление электроэнергии, повысить качество изготовляемой продукции [2]. Однако внедрение частотно-регулируемых электроприводов [3], выпрямителей и других полупроводниковых преобразователей [4] приводит к генерации высших гармоник тока и напряжения в шинопроводах, что негативно сказывается на коэффициенте мощности сети [5]. Наличие высших гармоник, а также их отклонение от нормированных значений, оказывает негативное влияние на эффективность и надежность элементов системы электроснабжения, в частности цеховых шинопроводов. Они могут приводить к существенному увеличению электрических сопротивлений шинопроводов, потерь напряжения, активных потерь, снижению коэффициента мощности сети [6]. Так, например, после модернизации систем электроприводов металлообрабатывающих установок, прокатных станов и мостовых кранов в цехах Запорожского литейно-механического завода, входящего в крупнейшую международную горно-

металлургическую группу Metinvest, возникла проблема потери мощности и напряжения системы питания мостовых кранов, что в результате привело к значительному снижению пускового момента асинхроных двигателей мостового крана на расстоянии 2/3, и полной его остановки примерно на 3/4 от полной протяженности пролета цеха. Это в значительной степени приводит к ограничению мощности цеховых электроприемников и нарушению производственно-технологических операций на этапах изготовления и транспортировки продукции.

Существующие в инженерной практике методики расчета параметров и характеристик шинопроводов основаны на методах схемного моделирования [7]-[9]. Параметры схем, как правило, определяются на основе обобщенных уравнений. Эти уравнения получены в следствии ряда допущений и приближений, что ограничивает область их использования.

Для оценки падения напряжения, в зависимости от коэффициента мощности сети, применяются классические методики [10] (для троллей шинопровода изготовленных из стали) и [11] (для троллей шинопровода изготовленных из цветных металлов), основанные на эмпирических зависимостях и не учитывают геометрию активных материалов, их электромагнитные свойства, частоту основной гармоники тока, поверхностные эффекты, эффекты близости и т.д. В работе [12] авторами на основе [10], [11] была предложена усовершенствованная методика определения потерь напряжения в шинопроводах с учетом частоты основной и высших гармоник тока, а также выполнена их сравнительная оценка при допустимом гармоническом составе тока, регламентированном стандартом [13], [14]. В результате оценки было показано, что при действии высших гармоник превышение потерь напряжения относительно основной гармоники составляет 1,13÷2,5 раза, в зависимости от коэффициента короткого замыкания [12]. Однако эти результаты было получены с допущением об отсутствии влияния эффекта близоста и скин-эффекта.

Так как действие эффекта близости и скин-эффекта усиливаются при действии высших гармоник, согласно [15], применение методик [10]-[12] не позволяет обеспечить требуемую точность и достоверность результатов, влияние гармонического состава токов и напряжений, нелинейность свойств активных материалов, поверхностные эффекты, эффекты близости и т.д.

Альтернативой методикам, основанных на обобщенных выражениях и эмпирических зависимостях, может быть применение методов расчета электрических параметров и характеристик на основе полевого моделирования [16]. Применение методов расчета на основе полевого моделирования получило распространение для широкого класса задач электротехники [17]-[20]. Однако его компьютерная реализация на основе методов конечных элементов в компонентных областях активной части с нелинейными электрофизическими свойствами осложнена большими затратами времени и требованиями к вычислительным ресурсам. В работе [21] предлагается определять электромагнитные параметры электротехнических систем преобразования переменного тока на основе реализации модели электромагнитного поля для задачи в time step формулировке. Такой подход позволяет учитывать нелинейность свойств активных материалов, гармонический состав токов и напряжений, но требует значительных затрат времени на численную реализацию из-за необходимости сходимости расчета каждого временного слоя. В работе [22] была предложена полевая модель в частотной формулировке. Такой подход требует значительно меньших затрат времени на численную реализацию и позволяет учесть в отдельности влияние каждой гармонической составляющей тока и напряжения на параметры и характеристики шинопроводов. Однако, использование частотной формулировки расчета распределения электромагнитного поля применимо только для линейных задач. Современные троллейные шинопроводы, как правило имеют пластиковые и стальные кожухи, стальные держатели, а также другие элементы конструкции из ферромагнитных материалов, обладающих существенной нелинейностью магнитных свойств. В [15] предложено использования эффективных значений магнитных свойств ферромагнитных материалов. Это позволяет учитывать нелинейность свойств как основных токоведущих, так и вспомогательных материалов в частотной формулировки постановки расчета распределения магнитного поля.

Таким образом, целью работы является разработка нового подхода определения параметров и оценки падения напряжений в троллеях фаз шинопроводов в условиях

действия высших гармоник тока, основанного на использовании полевых моделей, учитывающих конструктивные параметры, нелинейность магнитных свойств, электрофизические свойства материалов, влияние гармонических составляющих токов и напряжений, обладающих высокой точностью и эффективностью численной реализации

II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная идея нового похода заключается в определении параметров троллей шинопроводов и падения напряжения в них для основной и высших гармоник при соответствующих значениях амплитуд и спектрах частот тока, что позволит получить целый комплекс массивов данных и определить функциональные зависимости падений напряжений для определенного типа шинопровода от уровня генерации высших гармоник электротехнического оборудования и переменных параметров самой цеховой сети. Так как шинопровода имеют различную геометрию троллей, количество, расстояние между ними, разные формы кожухов шинопроводов, а также разновидность материалов, из которых они изготовлены, поэтому для каждого вида шинопровода разрабатывается полевая модель электрических и магнитных процессов, учитывающая конструктивные особенности, нелинейность электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов шинопровода.

При моделировании электромагнитных процессов в шинопроводе целесообразно приняты допущения об отсутствии монтажных держателей шинопровода, а также его крепежных элементов. В случае с металлическим экранируемым кожухом шинопровода, распределение магнитного поля за пределы расчетной области шинопровода отсутствует. При этом магнитное поле, создаваемое токами, которые протекают в троллеях шинопровода, локализуется в стальном кожухе и не выходит за его пределы. Это позволит значительно упростить геометрию шинопровода, что в значительной степени обеспечит сокращение времени расчета и вычислительных ресурсов, а также повышение устойчивости вычислительного процесса из-за отсутствия необходимости учета элементов, геометрические размеры которых значительно меньше основных элементов шинопровода.

Для учета влияния поверхностного эффекта и эффекта близости на величину активного и реактивного сопротивлений троллей шинопровода должна быть реализована задача расчета распределения плотности тока и удельных электрических потерь по поперечному сечению троллей и кожуха (с учетом и без учета экранирующих свойств) на основе сопряженных пространственных стационарных математических моделей электромагнитного преобразования электрической энергии переменного тока. Система уравнений Максвелла формулируется для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в геометрических электропроводящих областях и окружающей их электроизоляционной среды [16], [22]:

$$\begin{cases} -\nabla\cdot\left[\left(j\omega\sigma_i-\omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i}\right)\cdot\boldsymbol{A}_{i,k}+\right. \\ \left.+\left(\sigma_i+j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i}\right)\nabla V_{i,k}-\boldsymbol{J}^{e}_{i,k}\right]=0; \\ \left(j\omega\sigma_i-\omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i}\right)\boldsymbol{A}_{i,k}+\nabla\times\left(\mu_0^{-1}\mu_{r,i}^{-1}\nabla\times\boldsymbol{A}_{i,k}\right)+ \\ +\left(\sigma_i+j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i}\right)\nabla V_{i,k}=\boldsymbol{J}^{e}_{i,k}; \end{cases} \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с; σ – электрическая проводимость, См/м; $\varepsilon_0=8.854\cdot10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; ε_r – диэлектрическая проницаемость; $\boldsymbol{A}$ – векторный магнитный потенциал, Вб/м; V – комплексная амплитуда электрического потенциала, В; $\boldsymbol{J}^{e}$ – комплексная плотность тока, А/м^2; $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; μ_r – эффективная магнитная проницаемость; индекс $i=0$ – соответствует области электроизоляционной и окружающей среды ($\sigma=0$); индексы $i=1,2...n$ – соответствует области токопроводящих элементов конструкции шинопровода; индекс k – соответствует порядковому номеру гармоники тока.

При расчете параметров электромагнитного поля при частотной формулировке задачи, для каждой амплитуды и частоты соответствующей k-й гармоники должно выполнятся условие суперпозиции для электромагнитного поля по закону Био-Савара [23].

Длина секции шинопровода обычно может составлять 0,75, 1,5 и 3 м, а общая протяженность может превышать 1 км. Поэтому целесообразно считать, что поле в поперечном сечении шинопровода стремиться к плоско-

параллельному. Это позволяет существенно сократить размерность задачи и перейти от пространственной формулировки к плоскопараллельной [18], [22]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_i = n \cdot A_{zi}; \boldsymbol{B}_i = \boldsymbol{i} \cdot B_{xi} + \boldsymbol{j} \cdot B_{yi}; \\ \boldsymbol{H}_i = \boldsymbol{i} \cdot H_{xi} + \boldsymbol{j} \cdot H_{yi}; V_i = n \cdot V_{zi}. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (1), (2) дополняется условиями калибровки Кулона [13], условиями сопряжения областей с разными электрическими и магнитными свойствами и условиями электрической и магнитной изоляции на внешних границах и реализуется методом конечных элементов, например, в структуре средств ПО COMSOL Multiphysics. Температурный режим шинопровода рассчитывался в соответствии с [24], [25].

По данным численного моделирования можно определить энергию магнитного поля, удельную энергию магнитного поля, активные потери и удельные активные потери в расчетной i-й области при соответствующих значениях амплитуды и частоты k-й гармоники тока и коэффициентов короткого замыкания сети R_{sce} [19], [22]:

$$\begin{cases} W\big|_{i,k,m} = \dfrac{1}{2}\iint\limits_{S_i} \left(\boldsymbol{B}_{k,m} \cdot \boldsymbol{H}_{k,m}\right) dxdy; \\ w\big|_{i,k,m} = \dfrac{W\big|_{i,k,m}}{S_i}; \\ P\big|_{i,k,m} = \iint\limits_{S_i} \sigma_i^{-1} \dot{\boldsymbol{J}}_{k,m} \cdot \left(\dot{\boldsymbol{J}}_{k,m}\right)^* dxdy; \\ p\big|_{i,k,m} = \dfrac{P\big|_{i,k,m}}{S_i}. \end{cases} \quad (3)$$

где W_i – энергия магнитного поля; Дж; w_i – удельная энергия магнитного поля в i-й расчетной области, Дж/мм^2; S_i – площадь поперечного сечения i-й расчетной области, мм^2; P_i – активные потери, Вт; p_i – удельные активные потери, Вт; индекс j – номер расчетной области шинопровода; индекс m – соответствует размерности вектора коэффициентов короткого замыкания сети.

Активные, реактивные и полные электрические сопротивления троллей каждой из фаз [16], [22]:

$$\begin{cases} R\big|_{i,k,m} = P\big|_{i,k,m} \big/ S\big|_{i,k,m}; \\ L_{i,k,m} = \dfrac{2 \cdot W\big|_{i,k,m}}{\left|I_{i,k,m}\right|^2}; \\ X_{i,k,m} = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot f \cdot L_{i,k,m}; \\ Z\big|_{i,k,m} = \sqrt{R^2 + X^2}\Big|_{i,k,m}. \end{cases} \quad (4)$$

где I_i – ток троллей шинопровода в i-й расчетной области, А; L_i – индуктивность троллеи шинопровода, Гн; X_i – реактивное сопротивление троллей шинопровода, Ом; R_i – активное сопротивление троллей шинопровода, Ом; Z_i – полное сопротивление троллей шинопровода, Ом; f – частота основной гармоники тока, Гц.

Падение напряжения в троллеях шинопровода [18], [22]:

$$\Delta U\big|_{i,k,m} = \frac{I}{Z}\Big|_{i,k,m}. \quad (5)$$

Коэффициент короткого замыкания можно определить из следующего выражения [13]:

$$\begin{cases} R_{sce} = \dfrac{S_{sc}}{S_{equ}}; \\ S_{sc} = \dfrac{U_{nom}^2}{Z_{sc}}; \\ S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_{equ}; \end{cases} \quad (6)$$

где S_{sc} – мощность короткого замыкания трехфазной системы электроснабжения, ВА; S_{equ} – полная номинальная мощность технических средств, ВА; U_{nom}, – номинальное напряжение системы в точке общего присоединения на частоте сети, В; U_l – линейное напряжение в точки подключения электроприемников, В; Z_{sc} – полное сопротивление сети, Ом; I_{equ} – среднеквадратическое значение номинального фазного тока образца технических средств, А.

Используя уравнения (3) - (5), можно с достаточной точностью определить значения

активных и реактивных сопротивлений троллей шинопровода, а также падение напряжения на них при соответствующих значениях амплитуды и частоты k-й гармоники тока и коэффициентов короткого замыкания сети R_{sce}. Так как значение R_{sce} может меняется с изменением нагрузки цеховой сети, целесообразно определить нелинейную функциональную зависимость падения напряжения в троллеях шинопровода от двух переменных – основной и высших гармоник тока, а также и R_{sce}.

Для обработки расчетных данных и построения нелинейной функциональной зависимости от двух переменных можно воспользоваться бикубической интерполяцией сплайнами вида [26]:

$$\Delta U(k, R_{sce}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{m} a_{i,j} \cdot k^{i} \cdot R_{sce}^{j} \qquad (7)$$

где $a_{i,j}$ - матрица коэффициентов бикубического полинома; n - размерность вектора k-й гармоники тока; m - размерность вектора коэффициентов короткого замыкания R_{sce}.

Нахождение коэффициентов бикубического полинома сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, согласно [26].

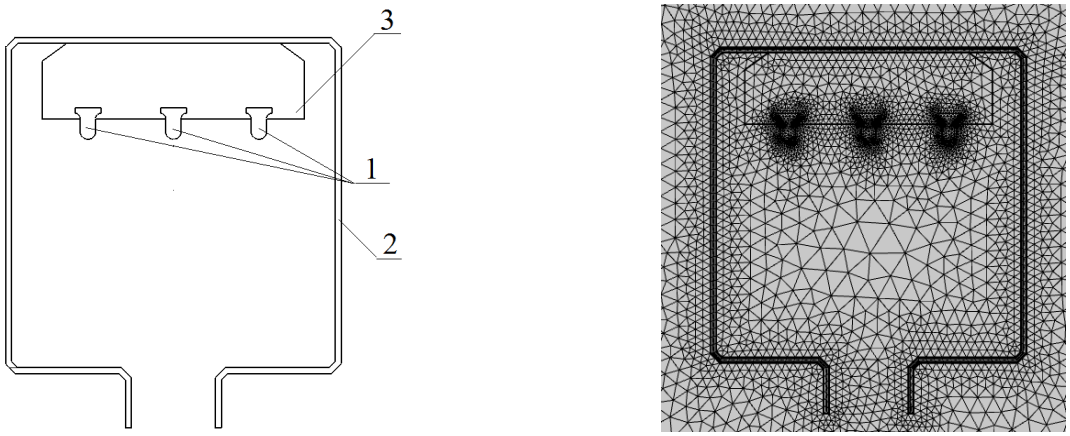
Уравнение (7) с известными коэффициентами бикубического полинома для разных геометрических форм троллей шинопровода позволит, с учетом нелинейности магнитных свойств, электрофизические свойства материалов, эффектов близости и скин-эффекта разработать более точную, а также модифицировать известные методики определения параметров троллей шинопроводов, а также оценки потерь напряжения и активных потерь, в зависимости от удельного содержания высших гармоник тока. Кроме этого, данный подход, в некоторых более сложных частных случаях, может быть использован при определении параметров шинопровода и оценки потерь напряжения на стадии проектирования и модернизации систем цеховых сетей путем подбора соответствующих, уже известных коэффициентов полинома в зависимости от условий удельного содержания высших гармоник тока и величины коэффициента короткого замыкания сети R_{sce}. Это позволит эффективно подобрать конфигурацию сети цехового электроснабжения, определить, места установки дополнительных подпиточных секций и шин, точно определить установленную мощность фильтрующих и компенсирующих устройств, что даст возможность повысить качество и надежность работы электроприемников с заявленными паспортными данными, а также повысить коэффициент мощности сети.

III. АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на примере троллейного медного шинопровода ШТМ-73 250А 660В. Геометрическая 2D модель и расчетная область в виде конечных элементов приведены на рис. 1. Данный шинопровод имеет широкое распространение и предназначен для питания мостовых кранов, электрических талей, подвесных электрических однобалочных кранов и напольных тележек. Шинопровод имеет три медных троллей 1, вмонтированных в кожух 2 (рис. 1, а). Троллеи в кожухе закреплены на изоляторах (клицах) 3(рис. 1, а).

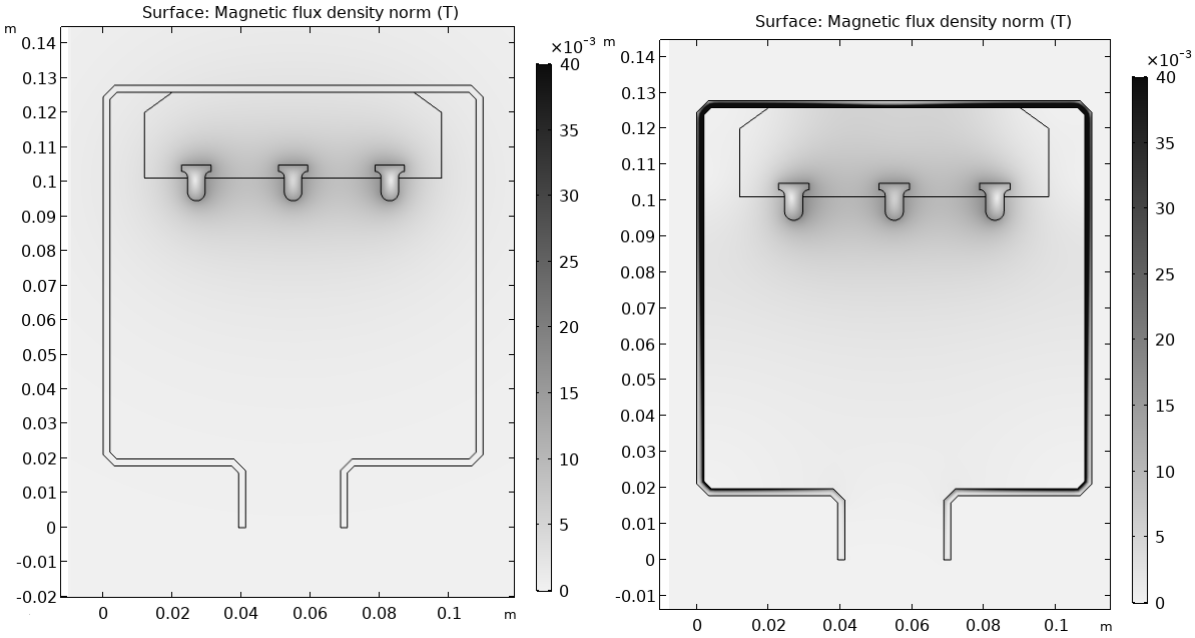
На рис.2 приведены результаты полевого моделирования электромагнитных процессов в шинопроводе без экранирования (кожух выполнен из пластика, рис.2, а) и с экранированием (кожух выполнен из конструкционной стали, рис.2, б) при величине тока основной гармоники 250А. Гармонический состав тока определялся для стандартных значений коэффициента короткого замыкания R_{sce}, (табл. 1) [13].

Относительно основной гармоники тока, значение нормальной составляющей индукции, от троллей к внутренней границе кожуха, меняется от 0,02 до 0,005 Тл (без экранирования) и 0,02 ... 0,01 Тл (при экранирование). В случае со стальным кожухом, в его пределах поле локализуется от внешней к внутренней границе и принимает значение



а) б)

Рис. 1. Геометрическая модель (а) расчетная область (б) шинопровода ШТМ-73 250А 660В[1]



а) б)

Рис. 2. Распределение нормальной составляющей индукции в шинопроводе ШТМ-73 250А 660В без экранирования (а) и с экранированием (б) при частоте основной гармоники тока 50 Гц.[2]

Таблица 1[3]

Нормы генерации гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных технических средств

Minimum value R_{sce}, p.u.	Overload current harmonic value, I_k/I_1, %			
	Harmonic's number			
	5	7	11	13
33	10,7	7,2	3,1	2
66	14	9	5	3
120	19	12	7	4
250	31	20	12	7
≥350	40	25	15	10

0,03 ... 0,1 Тл. При действии высших гармоник, для случая R_{sce}≥350, величина нормальной составляющей магнитной индукции во внутренних границах кожуха на 5-й гармонике может достигать 60% от основной, а на 13-й гармонике - до 30% от основной. При увеличении порядкового номера гармоники, для соответствующих значений их амплитуд (табл.1), проявляться эффект вытеснения поля к внутренней границе кожуха, что сопровождается ростом плотности магнитной индукции.

По данным численного моделирования, с использованием выражений (3), (4) определялись активные и реактивные электрические сопротивления троллей каждой из фаз шинопровода.

Точность результатов численного моделирования оценивается путем сравнения рас-

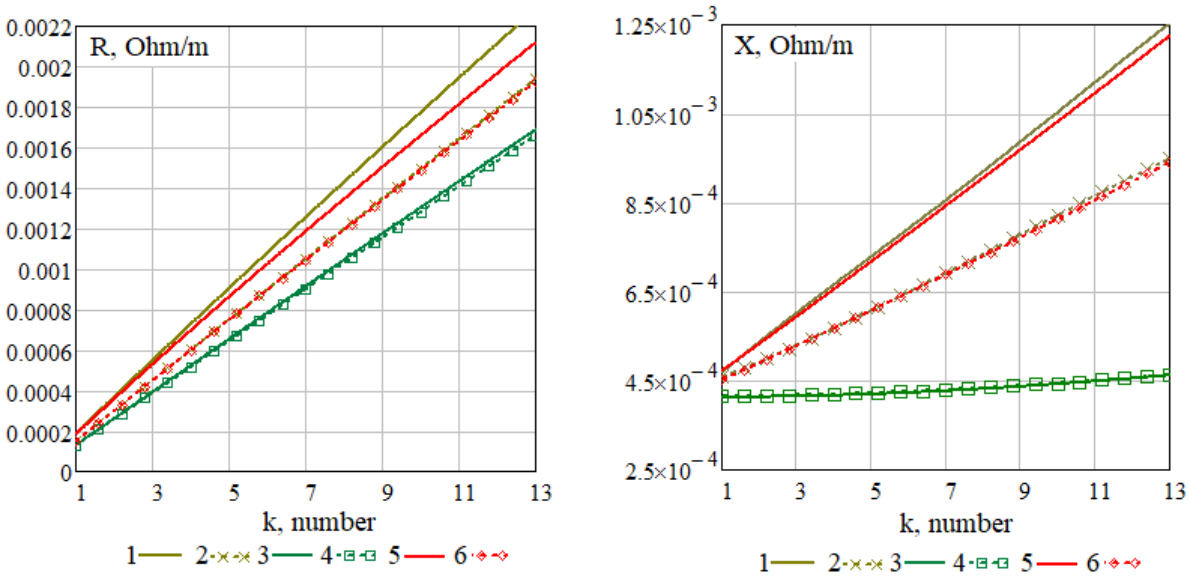
[1,2,3] см. Appendix

четных значений электрических сопротивлений троллей шинопровода с данными измерений завода изготовителя. По омическому сопротивлению погрешность не превысила 0,6%.

Поверхностные эффекты в троллеях фаз, как и эффект близости между ними относительно собственных частот k-х гармоник тока приводят к росту активного и индуктивного сопротивлений троллей фаз А и С по сравнению с центрально размещенной троллеи фазы В (рис. 3). При этом величина активного сопротивления фаз А и С относительно фазы В на 13-й гармонике увеличивается почти в 2 раза, а индуктивного – в 8 раз.

Применение шинопроводов с экранированным кожухом, магнитное поле которого замыкается через стальной кожух, усиливает эффект близости и скин-эффект в троллеях шинопровода, а также приводит к росту активных потерь. При этом имеет место еще больший рост активного, а также и индуктивного сопротивлений троллей фаз А и С близко расположенных к стальному кожуху шинопровода. Для троллея фазы В применение экранированного кожуха не оказывает влияние на величину собственных активного и индуктивного сопротивлений. При всех значениях коэффициента короткого замыкания сети R_{sce}, для которых регламентировано удельный вес высших гармоник тока [13], [14], активные и индуктивных сопротивления троллей фаз имеют одинаковые значения. Таким образом на параметры троллей шинопровода оказывает влияние только действующая частота k-й гармоники тока.

В табл. 2 приведены результирующие значения и значения для основной гармоники тока конструкционного параметра $tg\varphi$ для фаз шинопровода с учетом и без учета экранирования. Как показывает анализ, значение $tg\varphi_{рез}$, при результирующем действии высших гармоник тока, в среднем может увеличится в 3,5÷4 раза в зависимости от фазы, относительно расчетного значения $tg\varphi_1$ при основной гармоники тока. В случае использования стального кожуха имеет место незначительное увеличение значения параметра $tg\varphi$ фазы В. Однако для фаз А и С величина $tg\varphi$ ниже, что вызвано ростом активного сопротивления в троллеях этих фаз из-за действия поверхностного эффекта и эффекта близости.



а) б)

Рис.3. Результаты расчета активных (а) и реактивных (б) сопротивлений троллей шинопровода ШТМ-73 250А 660В относительно собственных частот k-й гармоники тока с учетом и без учета экранирования[4]

По данным численного моделирования для соответствующих значений R_{sce}, амплитуд и частоты гармоник тока (табл.1) с использованием выражения (5) были определены значения потерь напряжения в фазах на 1м длины троллей шинопровода.

[4] см. Appendix 1

Для рассматриваемого шинопровода с учетом и без учета экранирования для функции (7) были определены коэффициенты бикубического полинома.

Таблица 2[5]

Расчетные значения конструкционного параметра $tg\varphi$ троллей шинопровода ШТМ-73 250А 660В

Design parameter $tg\varphi$	Phase		
	A	B	C
with shielding			
$tg\varphi_1$	0,396	0,314	0,387
$tg\varphi_{рез}$	1,43	2,022	1,38
without shielding			
$tg\varphi_1$	0,327	0,311	0,332
$tg\varphi_{рез}$	1,472	1,981	1,476

По данным численного моделирования для соответствующих значений R_{sce}, амплитуд и частоты гармоник тока (табл.1) с использованием выражения (5) были определены значения потерь напряжения в фазах на 1м длины троллей шинопровода.

Для рассматриваемого шинопровода с учетом и без учета экранирования для функции (7) были определены коэффициенты бикубического полинома. Размерность матрицы этих коэффициентов составляет 7x4, что является достаточным условием для высокой точности описания функциональной зависимости в виде поверхности составляющих падений напряжения от значений k -ой гармоники тока и R_{sce}.

Таким образом матрица коэффициентов бикубического полинома для троллея фазы А шинопровода с пластиковым кожухом имеет вид:

$$a1 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.016 \\ 4.508e-3 & -1.159e-3 & 2.605e-4 & 9.703e-4 \\ 0.012 & 4.198e-3 & 7.859e-5 & -8.826e-4 \\ -1.363e-3 & 8.781e-3 & 3.575e-3 & 9.719e-4 \\ -1.761e-3 & -3.128e-3 & 1.982e-3 & 2.108e-3 \\ 2.171e-3 & -3.134e-3 & -5.786e-3 & -4.375e-3 \\ 7.281e-4 & 3.28e-3 & -2.818e-3 & -5.867e-3 \end{bmatrix}$$

для троллея фазы В –

$$a2 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.016 \\ 5.03e-3 & -5.563e-4 & -2.366e-4 & -7.681e-5 \\ 0.013 & 4.568e-3 & 1.181e-4 & -7.389e-4 \\ -1.167e-3 & 9.741e-3 & 3.922e-3 & 1.013e-3 \\ -1.526e-3 & -2.796e-3 & 2.646e-3 & 2.401e-3 \\ 2.278e-3 & -2.744e-3 & -5.255e-3 & -3.907e-3 \\ 1.007e-3 & 3.464e-3 & -2.476e-3 & -5.446e-3 \end{bmatrix}$$

для троллея фазы С –

$$a3 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.018 \\ 5.126e-3 & -1.185e-3 & 3.445e-4 & 1.109e-3 \\ 0.014 & 4.707e-3 & 2.836e-4 & -9.42e-4 \\ -1.555e-3 & 8.921e-3 & 3.899e-3 & 1.388e-3 \\ -1.919e-3 & -3.572e-3 & 1.252e-4 & 1.995e-3 \\ 2.93e-3 & -3.425e-3 & -6.603e-3 & -8.024e-3 \\ 2.527e-4 & 4.391e-3 & -3.089e-3 & -6.828e-3 \end{bmatrix}$$

для троллея фазы А шинопровода со стальным кожухом –

$$a4_{i,j} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.015 \\ 4.323e-3 & -1.249e-3 & 2.882e-4 & 1.057e-3 \\ 0.011 & 3.914e-3 & 2.856e-4 & -1.08e-3 \\ -1.762e-3 & 7.152e-3 & 3.209e-3 & 1.237e-3 \\ -2.097e-3 & -3.764e-3 & -7.614e-4 & 1.475e-3 \\ 2.593e-3 & -3.707e-3 & -6.857e-3 & -8.206e-3 \\ -1.566e-4 & 3.868e-3 & -3.332e-3 & -6.932e-3 \end{bmatrix}$$

для троллея фазы В шинопровода со стальным кожухом –

$$a5 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.017 \\ 4.877e-3 & -1.075e-3 & 2.928e-4 & 9.768e-4 \\ 0.013 & 4.542e-3 & 1.193e-4 & -7.552e-4 \\ -1.192e-3 & 9.639e-3 & 3.893e-3 & 1.02e-3 \\ -1.554e-3 & -2.842e-3 & 2.519e-3 & 2.365e-3 \\ 2.288e-3 & -2.791e-3 & -5.331e-3 & -4.063e-3 \\ 9.623e-4 & 3.475e-3 & -2.518e-3 & -5.515e-3 \end{bmatrix}$$

для троллея фазы С шинопровода со стальным кожухом –

$$a6 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0.018 \\ 5.245e-3 & -1.272e-3 & 3.931e-4 & 1.226e-3 \\ 0.013 & 4.758e-3 & 4.046e-4 & -1.084e-3 \\ -1.828e-3 & 8.039e-3 & 3.804e-3 & 1.687e-3 \\ -2.204e-3 & -4.15e-3 & -2.169e-3 & 1.572e-3 \\ 3.443e-3 & -3.922e-3 & -7.604e-3 & -0.012 \\ -4.639e-4 & 5.129e-3 & -3.538e-3 & -7.871e-3 \end{bmatrix}$$

[5] см. Appendix 1

На рис. 4 приведены зависимости в виде поверхности составляющих падений напряжения от значений k-ой гармоники тока и коэффициента короткого замыкания R_{sce} для каждой из фаз троллей на 1 м. длины шинопровода, соответственно с пластиковым (рис. 4, а, б, в) и стальным кожухом (рис.4, а, б, в). Как показывает анализ, наибольшее приращение падения напряжения имеет место для $k = 1 \div 7$ гармоник. Для $k \succ 7$ приращение падения напряжения снижается в 2÷3,5 раза. С увеличением R_{sce}, величины составляющих падений напряжения при $k \succ 2$ возрастает по прямолинейному закону и для $R_{sce} \geq 350$ может достигнуть своего 4 кратного значения. (рис.4).

Результатами моделирования подтверждается, что частота гармоник тока не оказывает влияние на несимметрию падения напряжения ΔU в фазах троллей шинопровода. При этом с ростом частоты k-й гармоники тока несимметрия ΔU относительно центральной троллея фазы В остается неизменным. Однако, в данном случае на уровень несимметрии ΔU оказывает влияние коэффициент которого замыкания R_{sce}, величина которого прямо пропорциональна амплитуде k-й гармоники. (см. табл.1.). Для цеховых сетей с $R_{sce} \geq 350$ несимметрия ΔU может возрасти в 10 раз относительно уровня несимметрии ΔU основной гармоники тока.

В табл.3. приведены расчетные относительные значения результирующего падения напряжения в фазах троллей А, В, С при разных значениях R_{sce} шинопровода с пластиковым кожухом.

Таблица 3[6]

Результирующее падения напряжения при разных значениях коэффициента короткого замыкания в фазах А, В, С троллеев шинопровода с пластиковым кожухом

Minimum value R_{sce}, p.u.	Resultant voltage loss U_{res}/U_1, p.u.		
	phase		
	A	B	C
33	1,62	1,58	1,62
66	1,852	1,74	1,848
120	2,155	2,01	2,15
250	2,942	2,70	2,932
≥350	3,51	3,19	3,496

[6] см. Appendix 1

Относительное значение результирующего падения напряжения представляет собой отношение:

$$\Delta U *_{рез} = \frac{\Delta U_{рез}}{\Delta U_1}; \quad (8)$$

$$\Delta U_{рез} = \Delta U_1 + \sqrt{\sum_{i=2}^{k} \Delta U_k{}^2}; \quad (9)$$

где ΔU_1 - падение напряжения для основной гармоники тока.

Для минимального значения $R_{sce} = 33$, при котором амплитуды гармоник имеют наименьшее ограничение стандартом [13], [14], результирующее падение напряжения в троллеях шинопровода увеличивается в 1,58…1,62 раза относительно основной гармоники. Для больших значений R_{sce}, превышение результирующего падения напряжения с учетом влияния высших гармоник может достигнуть 2,19…3,51 раза относительно величины потери напряжения при основной гармоники тока. При этом несимметрия напряжения между фазами А и В, В и С с ростом R_{sce} остается практически неизменной. Учитывая то, что номинальный ток шинопровода ШТМ-73 составляет 250А, на практике его токовая нагрузка может превышать 1,2…1,7 раза. Поэтому, результирующее превышение падения напряжения может быть значительно больше, чем расчетное результирующее превышение напряжения при номинальном токе шинопровода. По результатам исследования также была выполнена сравнительная оценка пофазного превышения падения напряжения в троллеях шинопровода с пластиковым и стальным кожухом. Для шинопровода со стальным кожухом при $R_{sce} = 33$ падения напряжения в фазе А на 7,48% выше относительно шинопровода с пластиковым кожухом; для фазы В – на 0,294%; для фазы С – на 9,09%. Для $R_{sce} \geq 350$ падения напряжения в фазе А – на 11,98%; для фазы В – на 0,76%; для фазы С – на 11,54%. При этом наибольшее превышение падения напряжения приходятся на фазы А и С, которые размещены в непосредственной близости к стальному кожуху.

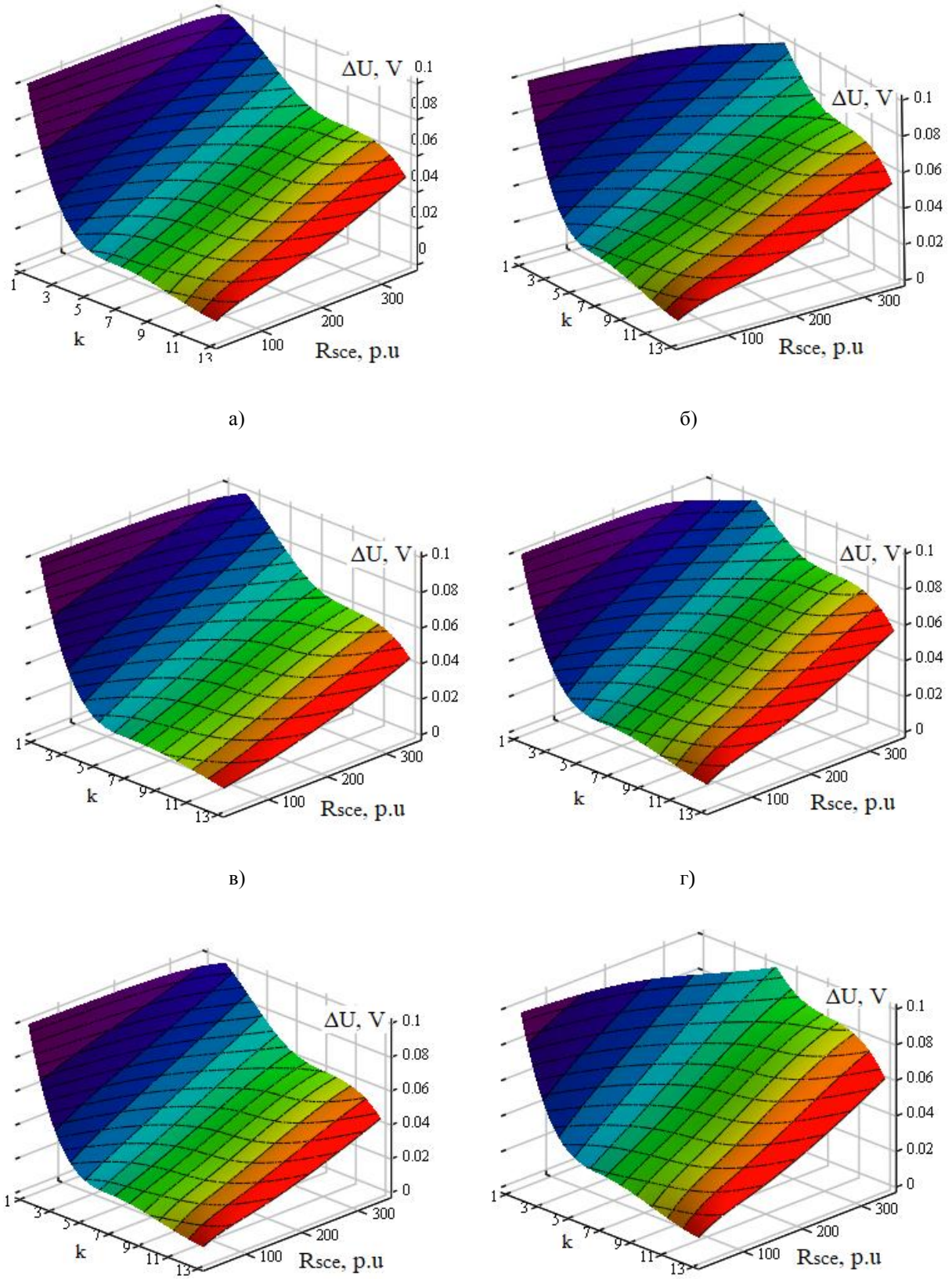


Рис. 4. Поверхности составляющих падений напряжения от k-й-гармоники тока и коэффициента короткого замыкания на 1 м длины шинопровода ШТМ-73 250А 660В [7]

[7] см. Appendix 1

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что для шинопровода типа ШТМ-73 250А 660В, действие высших гармоник при допустимых стандартом собственных значений амплитуд k-х гармоник приводит к увеличению активного (в 4 раза) и индуктивного (в 20 раз) сопротивлений**.** Определен уровень составляющих потерь напряжения в троллеях шинопровода при собственных значениях k-х гармоник тока и коэффициента короткого замыкания R_{sce}. При этом величина результирующего падения напряжения может возрасти в 3,5 раза, а с использованием стального кожуха – в 4 раза относительно основной гармоники. Результаты оценки результирующего падения напряжения от действия высших гармоник тока, которые получены с помощью данного подхода, основанного на полевом моделировании электромагнитных процессов в шинопроводе, в зависимости от коэффициента короткого замыкания R_{sce}, в 1,2-2,5 раза превышают результаты оценки результирующего падения напряжения, рассчитанные с помощью аналитических зависимостей [12]. В связи с этим известные методики не могут быть использованы при оценки потерь напрежения в условиях действиях высших гармоник тока. Поэтому применение данного подхода, при расчете двугих видов и форм троллей шинопроводов, с учетом особенностей конфигурации цеховых сетей даст возможность разработать обобщенную, уточенную методику определения параметров шинопровода и оценки потерь напряжения в условиях действия высших гармоник тока. Это позволит эффективно подобрать конфигурацию сети цехового электроснабжения, определить, места установки дополнительных подпиточных секций и шин, точно определить установленную мощность фильтрующих и компенсирующих устройств, что обеспечит возможность повысить качество и надежность работы электроприемников с заявленными паспортными данными, а также повысить коэффициент мощности сети.

ВЫВОДЫ

Разработана и предложена математическая модель электромагнитных процессов в троллейных шинопроводах, учитывающая их конструктивные особенности, нелинейность магнитных и электрофизических свойств, эффекты близости, поверхностные и внешние поверхностные эффекты, которая позволит с высокой точностью и эффективностью численной реализации определить составляющие активных и реактивных сопротивлений троллей шинопровода, падений напряжения и потерь мощности в процессе электропередачи для каждого собственного значения амплитуды и частоты гармоники тока.

Впервые установлено соотношение падения напряжения от спектров частот и амплитуд гармоник тока и значений коэффициента короткого замыкания, что позволяет выявить степень и характер влияния на асимметрию падения напряжения и параметры троллей шинопровода.

Впервые предложен подход оценки падения напряжения от спектров частот и амплитуд гармоник тока и значений коэффициента короткого замыкания, который позволит с высокой точностью и эффективностью, без затрат времени на полевое моделирование, эффективно подобрать конфигурацию сети цехового электроснабжения, параметры фильтрующих и компенсирующих устройств, что дает возможность минимизировать потери и повысить коэффициент мощности сети.

На основании предложенного подхода, при расчете и двугих видов, форм троллей шинопроводов, с учетом особенностей конфигурации цеховых сетей будет разработана обобщенная, уточенная методика определения параметров шинопровода и оценки потерь напряжения в условиях действия высших гармоник тока. Это позволит эффективно подобрать конфигурацию сети цехового электроснабжения, определить, места установки дополнительных подпиточных секций и шин, точно определить установленную мощность фильтрующих и компенсирующих устройств, что даст возможность повысить качество и надежность работы электроприемников с заявленными паспортными данными, а также повысить коэффициент мощности сети.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

Fig. 1. Design model (a) and computational area (b) of the busbar (ShTM-73 250A 660V).

Fig. 2. Distribution of the normal component of magnetic flux density in the busbar (STM-73 250A 660V) at the frequency of the first harmonic current (50 Hz).
Fig. 3. The results of the calculation of the resistance (a) and reactance (b) of the busbar's trolley (ShTM-73 250A 660V) for natural frequencies of the *k*-th current harmonics with and without shielding (1 - phase A, with shielding; 2 - phase A, without shielding; 3 - phase B, with shielding; 4 - phase B, without shielding; 5 - phase C, with shielding; 6 - phase C, without shielding).
Fig. 4. The surface of the voltage drop components at the *k*-th current harmonics and the short-circuit ratios for 1m length of busbar (ShTM-73 250A 660V).
Table 1. High harmonic generation standard for symmetrical three-phase technical device.
Table 2. The calculated values of the design parameter *tgφ* of the busbar's trolleys (ShTM-73 250A).
Table 3. The resulting values of the voltage drop at different short-circuit ratios in the phase A, B, C of busbar's trolleys with a plastic casing.

Литература (References)

[1] Lees, A., et al. Electromechanical Analysis of the Busbar Support System in the LHC Electrical Feed Boxes and their Consolidation with Remotely Installed Clamps. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 201, vol. 26, no. 4, doi:10.1109/TASC.2016.2527746.

[2] Zare F., Ledwich G. F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Trans. Power Electron*, 2002, Vol. 17, no. 4, pp. 508–516.

[3] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, *Y.* [Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter]. *"IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition"*. Long Beach, CA, USA, 2013, pp. 1213- 1218. doi: 10.1109/APEC.2013.6520453

[4] Ayachit, A., A. Reatti, and M. K. Kazimierczuk. "Magnetising Inductance of Multiple-Output Flyback Dc-Dc Convertor for Discontinuous-Conduction Mode." *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 4, 2017, pp. 451-461. doi:10.1049/iet-pel.2016.0390.

[5] Kotsur, M., Yarymbash, D, Kotsur, I., Bezverkhnia Yu. [Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors]. "*IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering"*. Lviv-Slavske, 2018, pp. 304-307 doi:10.1109/TCSET.2018.8336208

[6] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, *Y.* [Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter]. *"IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition"*. Long Beach, CA, USA, 2013. pp. 1213- 1218. doi: 10.1109/APEC.2013.6520453

[7] Yarymbash, D. S., Yarymbash S. T., Kotsur M. I., Litvinov D. O. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, no 1, pp 65-74. doi: 10.15588/1607-3274-2018-1-8

[8] Podol'tsev, A.D., Kontorovich, L.N. Chislennoe modelirovanie elektricheskikh tokov, magnitnogo polya i electrodinamicheskikh sil v silovom transformatore pri avariynom rezhyme s ispol´ MATLAB / SIMULINK i COMSOL [Numerical Simulation of Electric Currents, Magnetic Field and Electrodynamic Forces in Power Transformer at Emergency Operation Using MATLAB/SIMULINK AND COMSOL]. *Technical Electrodynamics*, 2011, no. 6, pp. 3-10. (In Russian).

[9] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2017, no. 1, pp. 24-30. (in English). doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4

[10] Fedorov, A.A. Spravochnik energetika promyshlennykh predpriyatiy T. 1. Elektrosnabzheniye [Reference book power engineering of industrial enterprises T. 1. Power supply]. Under the general ed. Fedorov A.A. *Moscow, Gosenergoizdat*, 1987, p. 840.

[11] Raputov, B.M. Elektro-oborudovanie kranov metallurgicheskikh predpriyatiy [Electric equipment of cranes of metallurgical enterprises]. *Moscow, Metallurgiya*, 1990, p. 272.

[12] Kotsur M. I., Yarymbash D.S., Bezverkhnia Yu.S., Andrienko A.A., Andrienko D.S. Features of influence of the higher harmonics on choice of busbars parameters for workshop networks. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2018, –no. №2 (50), pp. 51-56. doi: 10.15407/publishing2018.50.051

[13] IEC (61000-3-12: 2004) Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing.

[14] IEEE 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE standard. London, 1992, 519-1992.

[15] Rosskopf, A., Bar, E., Joffe, C. Influence of linner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron*., 2014,

Vol. 29, no. 10, pp. 5454–5461. doi: 10.1109/TPEL.2013.2293847

[16] Bastos, J. P. A, Sadowski, N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Boca Raton: CRC Press, 2003, 510 p. ISBN 9780203911174. doi: 10.1201/9780203911174

[17] Wu, X. W. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated busbars with the finite-element method. *IEEE Trans. Magn*., 2014, Vol. 50, no. 2, pp. 277–280.

[18] Popa, I., Dolan, A.I. [Numerical modeling of DC busbar contacts]. *"IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment"*. Brasov, 2013, pp. 188 – 193. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231869

[19] Bedkowski, M., Smolka, J., Banasiak, K., Bulinski, Z., Nowak, A. J., Tomanek, T., Wajda, A. Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear. *Int. J. Thermal Sci*., 2014, no. 82, pp. 122–129.

[20] Tiebing L., Xiang C., Haoliu Y., Lin L. Time-domain analysis of transient electromagnetic field generated by aerial busbars above lossy soil. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, Vol. 38, no. 2, pp.773-776. DOI: 10.1109/20.996200

[21] Luo, Y., Chen, R., Zhu, Y., Cheng, J. & Wei, M. [The analysis of magnetic field intensity and induced current under live working based on the finite element method], "*Proceedings - 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control, IMCCC"*. Qinhuangdao, 2015, pp. 192-195. DOI**:** 10.1109/IMCCC.2015.47

[22] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur I., Yarymbash, S. [Increasing efficiency of parameters determination of the trolley bus-bars by electromagnetic Field Simulation]. *"IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems"*, 2018, pp. 308-313.

[23] Izmaylov, S. V. (1962). Kurs Elektrodinamiki [Electrodynamics Course]. Moscow, *Gos. Uchebn-pedagog. izdatelstvo ministerstva prosveshcheniya*, 1962, p. 440.

[24] Plesca, A. Busbar heating during transient conditions. *Electric Power Syst. Res.*, 2012, no. 89, pp. 31–37. doi: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211

[25] Sung, W. P., Hyunsu Ch. [A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears]. *"IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition"*. New Orleans, LA, USA, 2014, pp. 1213- 1218. doi: 10.1109/HOLM.2014.7031066

[26] Korn, G. A., Korn, T. M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, *Nauka*, 1974, p. 832.

Сведения об авторах.

Коцур Михаил Игоревич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: kotsur8@gmail.com

Безверхняя Юлия Сергеевна, аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: juliaeea@ukr.net

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.
E-mail: yarymbash@gmail.com

Коцур Игорь Михайлович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина. E-mail: igor.m.kotsur@gmail.com

Reduction of Active Power Loss at 110/220 kV Node Substations Using Fuzzy Controller

Krysanov V.N., Burkovsky V.L., Danilov A.D.

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russian Federation

Abstract. One of the most important informational components of control systems is the data of the static load characteristics of each transformer of the substation. Currently, the evaluation of real static characteristics of the load is determined generally by the following methods: computational, analytical, passive and active experiments. These methods exhibit significant disadvantages regarding accuracy and cost rating and encounter plenty of parameters that are difficult to formalize (including climatic factors). The purpose of this work is to reduce electric power losses at 110/220 kV substations by implementation of a new control system for power transformers. This goal has been achieved by using a fuzzy controller in the structure of the control system for power transformers of 110/220 kV tie substations. The presented solution is multi-functional and can be extended to a wide class of power facilities. The results of the simulation of the transformer voltage regulation process, performed in the MatLAB application environment, showed that the implementation of a new fuzzy controller structure had improved the efficiency of the substation power control system in forecasting and management (compared to classical solutions based on regression and probabilistic models). Herewith, the most accurate accounting of consumer load, the maximum use of equipment at the substation for voltage regulation at the points of release and a significant reduction of active power losses at the tie substations 110/220 kV (up to 12,12%) compared to already known solutions were observed.
***Keywords*:** electrical substations 110/220 kV, loss of electrical power, voltage control, control system, static load characteristics, mathematical modeling, neuro-fuzzy networks.
DOI: 10.5281/zenodo.2650421

Reducerea pierderilor de putere activă la stațiile nodale 110/220 kV utilizând un controler fuzzy

Krysanov V.N., Burkovsky V.L., Danilov A.D.
Voronezh Universitatea Tehnică de Stat
Voronej, Federația Rusă.

Rezumat. Una dintre cele mai importante componente de informație ale sistemului de control al transformatorului de putere sunt datele privind caracteristicile de sarcină statică ale fiecărui transformator al stației. În prezent, determinarea caracteristicilor statice reale ale sarcinilor, de regulă se face de regulă cu utilizarea următoarelor metode: experimente computațional-analitice, pasive și active. Aceste metode posedă dezavantaje semnificative în ceea ce privește precizia, costul și luarea în considerare a parametrilor dificil de formalizat (inclusiv factorii climatici). Scopul acestei lucrări este de a reduce pierderile de energie electrică la stațiile de 110/220 kV cu ajutorul unui nou sistem de control al transformatoarelor de putere. Acest obiectiv se realizează prin utilizarea unui controler fuzzy în structura sistemului de comandă a transformatoarelor de putere ale stațiilor de nod 110/220 kV. O soluție nouă a fost propusă pentru organizarea funcțională a sistemului de control al echipamentelor de la stația de transformatoare, și anume, combinarea algoritmilor clasici (Mamdani) într-o structură a unui regulator fuzzy pentru a forma nucleu de aproximare a rețele neuronale artificiale și ajustări eficiente bazate pe utilizarea parametrilor principali ai sistemului de alimentare cu energie electrică (în cazul examinat - a stației transformatoarelor de forță). Această soluție este universală și poate fi extinsă la o gamă largă de instalații de putere. Regulatorul fuzzy dezvoltat diferă în mod favorabil de structurile similare utilizate în sistemele de control, ținând mai mult seama de cei mai importanți factorii care determină caracterul adecvat și precizia caracteristicilor de sarcină statică (dimensiunea, tipul de sarcină electrică a transformatoarelor de putere și factorul climatic).
Cuvinte-cheie: stații electrice 110/220 kV, pierderi de putere electrică, reglarea tensiunii, sistem de control, caracteristici de sarcină statică, modelare matematică, rețele neuronale fuzzy.

© Krysanov V.N., Burkovsky V.L.,
Danilov A.D., 2019

Снижение потерь активной мощности на узловых подстанциях110/220 кВ с помощью нечеткого регулятора

Крысанов В.Н., Бурковский В.Л., Данилов А.Д.
Воронежский Государственный Технический Университет
Воронеж, Российская Федерация.

Аннотация. Одной из важнейших информационных составляющих системы управления силовыми трансформаторами, являются данные о статических характеристиках нагрузки каждого трансформатора подстанции. В настоящее время определение реальных статических характеристик нагрузки, как правило, решается методами: расчетно-аналитическими, пассивных и активных экспериментов. Данные методы имеют существенные недостатки по точности, затратности и учету трудно формализуемых параметров (в том числе, климатических факторов). Целью данной работы является снижение потерь электрической мощности на подстанциях 110/220 кВ с помощью новой системы управления силовыми трансформаторами. Поставленная цель достигается применением нечёткого регулятора в структуре системы управления силовыми трансформаторами узловых подстанций 110/220 кВ. Предложено новое решение функциональной организации системы управления силовым оборудованием подстанции, а именно- совмещение в одной структуре нечеткого регулятора классических алгоритмов (Мамдани) обучения аппроксимирующего ядра искусственной нейронной сети и эффективные настройки на основные параметры системы электроснабжения (в рассматриваемом случае – силовой подстанции). Данное решение является универсальным и может быть распространено на широкий класс объектов электроэнергетики. Разработанный нечеткий регулятор выгодно отличается от применяемых в настоящее время аналогичных структур систем управления более полным учетом наиболее существенных факторов, определяющих адекватность и точность, статических характеристик нагрузки (величина, тип электрической нагрузки силовых трансформаторов и климатический фактор). Достижение поставленной цели подтверждается результатами расчетов. Показано, что реализация новой структуры нечёткого регулятора позволяет повысить эффективности системы управления оборудованием подстанций за счет повышения точности прогнозирования (на 5 %, в сравнении с существующими решениями, основанными на регрессионных и вероятностных моделях), а также максимально использовать имеющееся на подстанции оборудования для регулирования напряжение, что позволит снизить величину потерь активной мощности (до 12,12%) на узловых подстанциях110/220 кВ.

Ключевые слова: электрические подстанции 110/220 кВ, потери электрической мощности, регулирование напряжения, система управления, статические характеристики нагрузки, математическое моделирование, нечёткие нейронные сети**.**

Введение

Данное исследование посвящено актуальному вопросу минимизации потерь активной мощности в региональных сетях электроснабжения (EPS electrical power system). Его решение, в значительной степени, зависит от эффективности средств и методов управления потоками электрической мощности, особенно для сетей 110/220 кВ. Эти сети, являясь промежуточным звеном между системообразующими и распределительными сетями, эффективно влияют на режимы работы всей электроэнергетической системы. В тоже время, именно в этом сегменте наблюдается наиболее высокий уровень потерь энергии. Проблематике данного направления электроэнергетики посвящен ряд научных исследований [1-6]. Предлагаемые в них решения лежат в области реализации современных аппаратных (приоритетное направление), алгоритмических способов регулирования напряжения и реактивной мощности. В качестве передовых аппаратных решений предлагаются технологии «Гибких передач переменного тока» (Flexible AC transmission FACTS) и их базовое направление – статические устройства регулирования напряжения и реактивной мощности [7-9]. Однако, реализация предлагаемых аппаратных средств требует значительных затрат и не могут в должной степени функционировать без эффективной системы управления, учитывающий многие факторы, в том числе - реальные характеристики потребителей электрической энергии (состав и свойства отдельных потребителей в реальном времени, графики реальных и прогнозных нагрузок,) и климатические факторы (температура региона, освещенность и т.д.).

Поэтому, в настоящее время, особое внимание уделяется решениям в области программной части управления, в том числе - максимально точного определения статических характеристик нагрузки (SLC static load characteristics) [10-12]. Как правило,

эти задачи решаются посредством методов: расчетно-аналитических, пассивных и активных экспериментов. Данные методы имеют свои недостатки по точности, затратности и не учету слабо формализуемых параметров (в том числе, климатических факторов). Погрешность функционирования достигает 3%-6%) [12, 13]. Мировой опыт исследований по этому вопросу показывает широкое использование комбинированных нечётких нейронных сетей (FNN fuzzy neural networks) для прогнозирования и принятия управленческих решений по реализации энергоэффективной работы EPS [14-19]. Их применение является ключевым пунктом, позволяющим достичь существенного повышения эффективности прогноза в сравнении с классическими решениями, основанными на регрессионных и вероятностных моделях [20-23]. В то же время, на настоящий момент нет данных по программной реализации системы управления (CS control system) оптимального регулирования напряжения на узловых подстанциях (ES Electrical Substation) 110/220 кВ (с прогнозированием параметров SLC и изменений структуры EPS) по критерию минимума потерь активной мощности.

Целью данного теоретического исследования является разработка новых алгоритмов CS трансформаторным оборудованием, регулирующим напряжение на подстанциях, которые позволят снизить потери активной мощности на узловых ES.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Задача определения возможности снижения потерь активной мощности узловых ПС решается с помощью новых алгоритмических решений CS на основе FNN. При этом учитывалось, что потери активной мощности зависят от многих факторов технического, экономического, организационного и климатического характера. Как правило, при определении величины потерь активной мощности рассматриваемых EPS, учет всех факторов практически невозможен и потому были рассмотрены только технические факторы, связанные с процессом регулирования напряжения трансформаторами ES. Основные составляющие потерь активной мощности: $\Delta P_{нагр.}$ – нагрузочные потери активной мощности; $\Delta P_{усл.пост.}$ – условно-постоянные потери активной мощности (за исключением потерь на корону); $\Delta P_{кор.}$ – потери активной мощности на корону[2, 4, 5]:

$$\Delta P_{\sum} = \Delta P_{нагр.} + \Delta P_{усл.пост.} + \Delta P_{кор.} \quad (1)$$

В свою очередь:

$$\Delta P_{нагр.\%} = \frac{1}{\left(1+\frac{\Delta U\%}{100}\right)^2} - 1 == \frac{S^2}{U^2}\left[\frac{1}{\left(1+\frac{\Delta U\%}{100}\right)^2} - 1\right] R_э' \quad (2)$$

$$\Delta P_{уст.пост.\%} = \left(1+\frac{\Delta U\%}{100}\right)^2 - 1 = \Delta P_{xx} \cdot \sum_{i=1}^{m} T_{pi} \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2, \quad (3)$$

$$\Delta P_{кор.\%} = 6{,}88\left(1+\frac{\Delta U\%}{100}\right)^2 - 5{,}88\left(1+\frac{\Delta U\%}{100}\right) - 1 = \Delta p_{кор} \cdot L \cdot k_{U_{кор}} \quad (4)$$

где $U_{\%}$ – изменение величины питающего напряжения в процентном выражении;

S - величина полной мощности, протекающей через элементы транспорта;

U – текущее значение напряжения питания;

$R_э$ – эквивалентное активное сопротивление элементов транспорта перетоков мощности;

ΔP_{xx} – мощность холостого хода трансформаторов;

T_{pi} – число часов работы трансформатора в i -том режиме;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение работы трансформатора;

$\Delta p_{кор}$ – средние удельные потери на корону;

L - протяжённость линии;

$k_{U_{кор}}$ - коэффициент потерь на корону, равный:

$$k_{U_{кор}} = 6.88\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2 - 5.88\left(\frac{U}{U_{ном}}\right) \qquad (5)$$

Используя для определения потерь активной мощности выражения 1-5, был проведен анализ функционирования типовой ES 110/220 кВ с тремя силовыми автотрансформаторами, имеющими средства регулирования напряжения (устройство регулирования под нагрузкой и вольтодобавочные трансформаторы). В качестве контрольных параметров ES анализировались напряжения, токи, cosφ режимных дней за период трёх лет. Так, среднее значение cosφ в часы минимума составляло 0,438-0,81. Что свидетельствует о низкой эффективности регулирования напряжения ES. Основные причины – в ограниченным коммутационном ресурсе устройств регулирования и в неэффективности системы управления, недостаточно учитывающей фактические SLC узла нагрузки (имеющие как детерминированный, так и случайный характер) и климатический фактор. Используемые в настоящее время SLC получены экспериментальным путем для типовых узлов нагрузки. Реальный характер нагрузки силовых подстанций значительно отличается от типовых значений, причем он имеет явно выраженный цикличный, сезонный характер (суточные, недельные годовые колебания). Таким образом, оптимизация режима работы EPS (в том числе и силовых подстанций) зависит от учета большого количества как детерминированных, так и вероятностных факторов [24, 25, 35, 36]. Обычно, для оптимизации режимов EPS по критерию минимума потерь активной мощности, используется две основные модели: модель управления на основе уравнения Лагранжа (приведением оптимизационной задачи к виду, при котором осуществляется поиск абсолютного экстремума), а также градиентные модели (в частности, разновидности алгоритма Ньютона-Рафсона).

Модель оптимизации по критерию минимума потерь мощности в EPS можно реализовать в виде следующей целевой функции:

$$F_j = \sum_{i=1}^{k} W_i = \sum_{i=1}^{k} [A + B + C] \qquad (6)$$

где:

$$A = \frac{\left(\sqrt{P_i(U)^2 + Q(U)^2}\right) \cdot R_{Эi}}{U_i^2} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta U_{\%i}}{100}\right)^2} - 1\right);$$

$$B = \Delta P_{xxi} \cdot T_{pi} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{НОМi}}\right);$$

$$C = \Delta p_{kopi} \cdot L_i \cdot k_{Ukopi};$$

W - величина потерь мощности в элементах EPS, остальные параметры из формул (2) – (5).

При расчете режимов EPS необходим учет ограничений:

$$\begin{cases} |P_{внi} + P_{ci}| > 0; \\ |Q_{внi} + Q_{ci}| > 0; \\ i = 1,..., k; \end{cases} \qquad (7)$$

где $P_{внi}, Q_{внi}$ - значения внутренних, а P_{ci}, Q_{ci} - внешних потоков активной и реактивной мощности элементов EPS.

Уравнения (6), (7) необходимо дополнить выражениями, учитывающими диспетчерское управление:

$$\overline{V} = V(Y) + \xi_V, \qquad (8)$$

$$\varphi = \left[\overline{V} - V(Y)\right]^T R_V^{-1} \left[\overline{V} - V(Y)\right], \qquad (9)$$

где $\overline{V}$ – вектор измеренных значений, являющийся функцией от вектора истинных значений управляемых величин - $V(Y)$ и составляющей неопределённых факторов при проведении процесса измерения - ξ_V;

φ – функционал точности производимых измерений;

R_V – диагональная ковариационная матрица;

T – транспонирование матрицы.

При нахождении абсолютного экстремума, на основе метода Лагранжа, неравенства-ограничения преобразуются в соответствующие равенства, а свободные члены переносятся в левые части ограничений.

Для данной задачи функционал Лагранжа имеет вид:

$$L = \sum \left[F_j(P_b) + \lambda_j \cdot f(P(U), Q(U))\right], \qquad (10)$$

где $F_j(P_b)$ - целевая функция j - й подсистемы; $f(P(U),Q(U))$ - ограничения подсистемы;

λ_j - множитель Лагранжа.

А основная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \left(\dfrac{\partial F_j(P_b)}{\partial P_j} - \lambda\left(1 - \dfrac{\partial F_j}{\partial P_b}\right)\right) = 0; \\ P_L(P(I), QP(U)) + F_j = 0; \\ j = 1,..., K; \end{cases} \quad (11)$$

для решения системы (11), она на каждом шаге должна быть заменена системой, включающей в себя только приращения отдельных переменных и производных, входящих в первоначальную систему.

Для учета всех подсистем и их связей используется базовый алгоритм Ньютона второго порядка, включающий на каждой итерации несколько действий [26].

Таким образом, общим недостатком моделей на основе метода Лагранжа является фактический не учёт неопределённых составляющих (и, как следствие, значительное снижение точности определения SLC), необходимость задания большого количества входных параметров, сложность и длительность расчетов.

Для упрощения расчетов по определению абсолютного экстремума методом Лагранжа, целесообразно нахождении локального экстремума на основе целевой функции (6) при ограничениях вида (7). Это реализуется на основе градиентного метода с постоянным и переменным шагом (алгоритм Ньютона-Рафсона) [26, 27]. А задача фактического учёта неопределённых составляющих здесь может быть реализована дополнением этого метода элементами FNN.

Как показывают исследования в области имитационного моделирования, именно математические модели на основе комбинированных FNN, нашли широкое применение для случаев учета сложно формализуемых и непредсказуемых параметров [21, 28-30]. Как следствие, нечеткое регулирование дает возможность оптимизации работы CS (в том числе и по критерию минимума потерь активной мощности). Но конкретно, для задач имитационного моделирования оптимизации режима EPS по критерию минимума потерь активной мощности, эффективных решений на сегодняшний день нет.

Для решения поставленных в данном исследовании задач, был разработан оригинальный блок нечеткого регулирования CS силовыми регулируемыми трансформаторами ES на базе FNN в пакете Simulink программы MatLAB [31]. Реализовано уточненное описания объекта управления (силовые трансформаторы ES) и блока расчета SLC CS.

За основу описания SLC взят полином второй степени [11, 11, 12]. Он указывает на возможность управлять потоками активной P и реактивной мощности Q путем изменения напряжения силовых трансформаторов U. В качестве исходных коэффициентов SLC, уравнений (12) — (14) для имитационной модели CS трех силовых автоСтрансформаторов (AT1, AT2, AT3), были приняты имеющиеся диспетчерские данные рассматриваемого узла энергопотребления.

Эти зависимости легли в основу расчетов определения эффективности системы управления, на базе блока нечеткого регулятора (FC fuzzy controller), структурная схема которого приведена на рис. 1. В ней три основных элемента: FNN – нечеткая нейронная сеть, которая является универсальным аппроксиматором; CO (control object) — объект управления (ES 110/220 кВ с тремя силовыми автотрансформаторами, имеющими типовые средства регулирования напряжения); ANN (artificial neural network) – искусственная нейронная сеть [30, 32-35].

Выражение SLC для AT1:

$$\begin{cases} P_1(U) = P_{1ном}(U)\cdot \\ \left[2{,}17 - 1{,}55\cdot\left(\dfrac{U}{U_{ном}}\right) + 3{,}57\cdot\left(\dfrac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \\ Q_1(U) = Q_{1ном}(U)\cdot \\ \left[6{,}25 - 3{,}8\cdot\left(\dfrac{U}{U_{ном}}\right) + 4{,}9\cdot\left(\dfrac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \end{cases} \quad (12)$$

Выражение SLC для AT2:

$$\begin{cases} P_2(U) = P_{2ном}(U)\cdot \\ \left[3{,}51 + 2{,}9\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + 1{,}15\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \\ Q_2(U) = Q_{2ном}(U)\cdot \\ \left[2{,}87 - 2{,}5\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + 5{,}1\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \end{cases} \quad (13)$$

Выражение SLC для АТ3:

$$\begin{cases} P_3(U) = P_{3ном}(U)\cdot \\ \left[2{,}47 + 5{,}17\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + 1{,}03\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \\ Q_3(U) = Q_{3ном}(U)\cdot \\ \left[2{,}71 - 4{,}02\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + 9{,}4\cdot\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2\right]; \end{cases} \quad (14)$$

ИНС используется в качестве эталонной модели, обученная на основе модели СО, работающего в режиме без нагрузки.

В ней используется текущее изменение воспроизводимого вектора управляющей функции в i-й момент времени – $g_3(i)$ и выхода эталонной модели ОУ – $y_2(i+k)$. Эталонная модель описывает динамику ОУ в соответствующих временных «срезах» непрерывного процесса перетока мощностей, обучаясь по прогнозу ошибки – $e_2(i+k) = y_2(i+k) - y_{oy}(i)$, и управляющему сигналу – $y_1(i+k)$. Вектора настройки - w_1, w_2 позволяют производить корректировку параметров входных термов (для FNN) и активационных функций (для ANN).

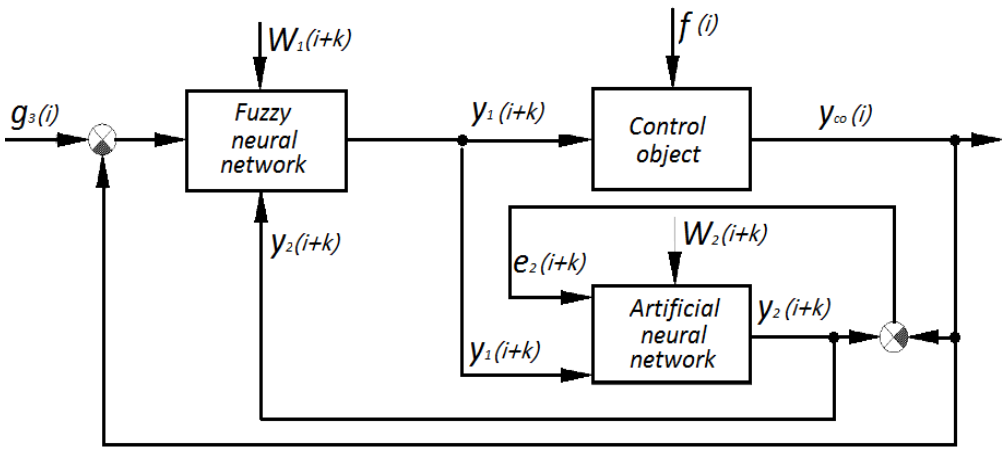


Рис. 1. Структурная схема блока нечеткого регулятора системы управления.
Fig.1 Diagram of a control system fuzzy regulator block.

При реализации структуры (рис.1) и соответствующей настройки блоков ANN и FNN, FC реализует инверсную модель ОУ и является управляющим контроллером, обладающим высокими адаптивными свойствами так как, учитывает неопределённые факторы и воздействия, влияющие на СО. Конечной целью функционирования блока FC CS является формирование управляющего вектора $U_{reg}(i+k)$ на период $(i+k)$ относительно i-го дискрета времени.

Блок идентификации параметров эталонной модели ANN: структура – многослойный персептрон; количество нейронов скрытого слоя – 250; выборка интервала – 0,35 с.; количество элементов задержки на входе и выходе –2; тренировочная выборка – 5000; количество эпох настройки– 500; алгоритм настройки – trainbr.

В качестве входных данных обучающей выборки выступают линейные напряжения питания трансформаторов: U_{AB}, U_{AB}, U_{CA}. В качестве выходного сигнала эталонной модели получаем прогнозные значения: U_{ABreg}, U_{BCreg}, U_{CAreg} состояния СО в последующие периоды времени. Для каждого

из них применяется свой канал обучения. Параметры настройки такой FNN взяты в соответствии с реализацией Мамдани [30]. Распределение термов принадлежности $\left(M(i)\times S(i)\times U^{*}(i)\right)$ - $9\times 3\times 3$. Количество правил обучения – 184 единицы. Тип передаточной функции входных термов – psigmf. Тип передаточной функции выходного терма $U_{reg}(i+k)$ – linear. Структура ANN - многослойный персептрон: количество слоёв – 4 единицы; количество скрытых слоёв - 2 единицы; число элементов обучающей выборки - 18970 единиц; число элементов тестовой выборки - 376 единиц. В качестве условия остановки обучения принят рост среднеквадратичной ошибки. Метод обновления весов искусственной нейронной сети – эпоха (свободно масштабируемый временной период). Конечным результатом моделирования FNN является уточняющий коэффициент, который совместно с базой данных предшествующих периодов, позволяет получить абсолютные значения управляющего сигнала $y_1(i+k)$.

В качестве целевой функции работы FNN был принят критерий:

$$J(t)=\frac{1}{2}\sum_{i}(d_i(t)-y_i(t))^2\,, \qquad (15)$$

где $d_i(t)$ – планируемое значение процесса управления для выхода сети;

$y_i(t)$ – действительное значение выхода сети;

$J(t)$ – целевая функция оценки качества.

Кроме целевой функции, использовались критерии оценки качества реализованной FNN.

1. Среднеквадратическая ошибка:

$$\varepsilon=\frac{\sum_{j=0}^{P}\sum_{i=0}^{N}d_{ij}-y_{ij}}{NP}\,, \qquad (16)$$

где P – число нейронов сети;

N – число обучающих выборок, подаваемых на вход;

d_{ij} –желаемое значение выхода сети на каждом шаге функционирования;

y_{ij} – выход сети на i-ом шаге;

ε – среднеквадратическая ошибка.

2. Коэффициент корреляции:

$$r=\frac{\dfrac{\sum_{i}(x_i-\bar{x})(d_i-\bar{d})}{N}}{\sqrt{\dfrac{\sum_{i}(d_i-\bar{d})^2}{N}}\cdot\sqrt{\dfrac{\sum_{i}(x_i-\bar{x})^2}{N}}}\,, \qquad (17)$$

где x_i – выход сети на i-ом шаге обучения;

d_i – желаемый выход сети;

$\bar{x}$ – среднее значение выхода сети;

$\bar{d}$ – среднее значение желаемого выхода сети;

r r – коэффициент корреляции.

3. Процент ошибок

$$\varepsilon_{\%}=\frac{100}{NP}\sum_{j=0}^{P}\sum_{i=0}^{N}\frac{\left|dy_{ij}-dd_{ij}\right|}{dd_{ij}}\,, \qquad (18)$$

где dy_{ij} – денормированное значение выхода сети;

dd_{ij} – денормированное желаемое значение выхода сети;

$\varepsilon_{\%}$ – процент ошибок.

Условием остановки процесса обучения FNN является, либо прошедшее число итераций (эпох обучения), либо достижение уровня ошибки (погрешности) управления порядка 1,2-1,5%.

В качестве входных переменных используются: база данных о отпускаемой ES мощности в предыдущие периоды (значения $P(i)$), данные о циклических и случайных факторах (внешние воздействия окружающей среды, режимы работы, связанные с календарной периодичностью) – $M(i)$ и планируемой структуры рассматриваемой системой электроснабжения – $S(i)$. Эти параметры, с высокой степенью точности, можно считать интегральными параметрами, оказывающими воздействие на всю систему электроснабжения. На выходе FC формируется вектор $U_{reg}(i+k)$ – величина корректировки регулируемого напряжения для достижения оптимального значения по критерию минимума потерь активной мощности. При этом реали-

зуется требуемый показатель перетока мощности в оперативном режиме на заданные интервалы времени будущих периодов, в виде вектора $P(i+k)$ на период $(i+k)$ относительно i – й дискреты времени.

В процессе изменения нагрузки присутствуют регулярная и случайная составляющие, требующие учёта при осуществлении управления перетоков мощности. Циклическая составляющая, в основном, обусловлена сезонными трендами, биологическим ритмом жизни, продолжительностью рабочего дня. Случайная составляющая, входящая в состав векторов $M(i)$ и $S(i)$, определяется большим числом факторов. Среди них, в качестве основных (на долю которых приходится до 90 % преобразуемой и потребляемой электроэнергии), выделяются: температурные колебания в короткие промежутки времени (от часа до нескольких суток); оперативные изменения в структуре системы электроснабжения; режим функционирования потребителей электрической мощности (степень загруженности энергоемких производств и день недели); естественная освещённость среды.

Вектор $M(i)$ может быть описан выражением вида:

$$M(i) = F(t_{окр.}(i-n); q_{окр}(i-n); P^{*}(i-n)), \quad (19)$$

где $M(i)$ - вектор внешних циклических и случайных факторов;

$t_{окр.}(i-n)$ – влияние температурного фактора на вектор внешних циклических и случайных факторов в периодах $(i-n)$;

$q_{окр}(i-n)$ – влияние фактора естественной освещённости на вектор внешних циклических и случайных факторов в периодах $(i-n)$;

$P^{*}(i-n)$ – влияние трендов потребления перетоков мощности на вектор внешних циклических и случайных факторов в периодах $(i-n)$.

Анализ графиков колебания величины мощности в системе электроснабжения и средней температуры воздуха окружающей среды, дают возможность сделать вывод о существенном влиянии составляющей $t_{окр.}(i-n)$ на вектор $M(i)$. Как правило, для систем энергоснабжения северных стран, с ростом величины средней температуры (до определённого уровня) снижается уровень потребления в энергосистеме. Это вызывается расходом энергии на отопительные нужды как производственных, так и жилых помещений. Для южных стран эта зависимость обратная. При моделировании этих процессов целесообразно учитывать инерционность данной зависимости, выражающуюся в возрастании/убывании уровня энергопотребления в течение нескольких суток после соответствующего (увеличивающего или уменьшающего) изменения температуры воздуха окружающей среды.

Показатель естественной освещённости - $q_{окр}(i-n)$ имеет тоже существенное влияние на степень потребления электроэнергии в системе энергоснабжения, так как усреднено, около 11,3 % всей нагрузки составляют осветительные приборы.

Вектор $S(i)$ может быть описан выражением вида:

$$S(i) = F(r(i-n); r(i+n); \zeta_r), \quad (20)$$

где $r(i-n)$ - влияние предшествующих изменений структуры элементов системы энергоснабжения на вектор внутренних циклических и случайных факторов в периодах $(i-n)$;

$r(i+n)$ - планируемое влияние фактора изменений структуры системы энергоснабжения (ремонтные режимы, вывод в модернизацию старых и ввод новых элементов) на вектор внутренних циклических и случайных факторов в периодах $r(i+n)$;

ζ_r - степень влияния случайных изменений структуры системы энергоснабжения (аварийные режимы) на вектор внутренних (структурных) изменений.

Формирование векторов $M(i)$ и $S(i)$ производилось на основе данных обработки статистической информации за период 5 лет. База данных потребления электрической мощности $P^{*}(i)$ за прошлые периоды (10 лет) формировалась, с приоритетом значимости последних периодов,

относительно предшествующих периодов обработки информации.

Расчеты прогнозируемой электрической мощности проводились с помощью ANFIS модуля программы MatLAB, в соответствии с формулами (21, 22):

$$G_{k+n} = R(k) \cdot G_k + \zeta_{конт.вин.}(k+n), \quad (21)$$

$$\zeta_{конт.вин.}(k+n) = \zeta_m + \zeta_r, \quad (22)$$

где $R(k)$ - матрица, учитывающая текущие характеристики и структуру рассматриваемой системы энергоснабжения;

$\zeta_{конт.вин.}(k+n)$ - вектор контроля динамики случайных составляющих для периода $k+n$;

G_k - вектор уровня электрической мощности в k -й дискрет времени;

ζ_m – величина влияния случайных составляющих метеофакторов [36].

В соответствии с формулами (23 – 26), числовые значения входов FNN были нормированы.

$$N_i^N = X_i \cdot N_i + S_i, \quad (23)$$

где N_i^N – нормированное значение i – ой входной переменной;

N_i – реальное значение i – ой входной переменной.

Денормированное значение входной переменной:

$$N_i = \frac{N_i^N - S_i}{X_i}, \quad (24)$$

$$X_i = \frac{x_n + x_v}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (25)$$

где X_i – значение амплитуды i – ой входной переменной;

x_v – верхняя граница активационной функции;

x_n – нижняя граница активационной функции;

$x_{\min}$ – минимальное значение i – ой входной переменной;

$x_{\max}$ – максимальное значение i – ой входной переменной.

$$S_i = x_v - X_i \cdot x_{\max}, \quad (26)$$

где S_i – смещение i – ой входной переменной.

В результате такого нормирования, входные и выходные параметры модели FNN нечеткого регулятора CS трансформаторным оборудованием подстанции были представлены в следующем виде: - нормированное значение входного сигнала M(i), учитывающего внешние воздействия на EPS -300%…150%;

- нормированное значение входного сигнала S(i), учитывающего изменение структуры EPS - 0…1 (в относительных единицах);
- нормированное значение входного сигнала P*(i), показывающее потребления мощности в период временного интервала управления - 1…3,5 (в относительных единицах);
- нормированное значение выходного сигнала P(i+n), показывающее потребления мощности в будущий период – 0,5…3,0 (в относительных единицах).

Предложенный FC является эффективным элементом CS трансформаторным регулировочным оборудованием, которая может осуществлять оптимизацию режима работы ES по критерию минимума потерь активной мощности. Структура такой CS, в основе которой используется метод Ньютона - Рафсона дополненный FNN (рис.1), реализована на обобщенном алгоритме, представленном рис. 2.

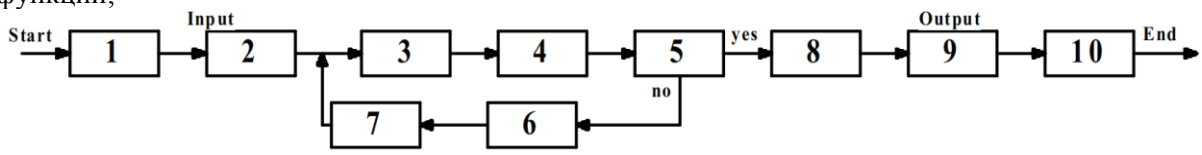


Рис. 2. Обобщённый алгоритм оптимального управления по критерию минимума потерь активной мощности.
Fig. 2 Generalized algorithm of an optimal control based on the criterion of the minimum active power loss.

В нем предусмотрена следующая последовательность операций.

1. Задание активной и реактивной мощности как функция от модуля и фазы напряжения (в предыдущих дискретах времени - для оптимизации режима в соответствии с целевой функцией (6) и с учётом используемых параметров SLC (12-14)).

2. Проверка выполнения граничных условий в соответствии с (7).

3. Определение значений активной – $P_{HHPi}(U^P;\theta^p)$ и реактивной- $Q_{HHPi}(U^P;\theta^p)$ мощности в последующих периодах посредством FC (рис.1).

4. Определение вектора небалансов мощностей, определяемого, исходя из управления режимом в предыдущих периодах:

$$f(F^P)=\begin{vmatrix}-\Delta P^p\\-\Delta Q^P\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\overline{P}(U^p)-P(U^p,\theta^p)\\\overline{Q}(U^p)-Q(U^p,\theta^p)\end{vmatrix},$$

где $f(F^P)$ - вектор небалансов на n- ой итерации;

$\overline{P}(U^p)$, $Q(U^p)$ – заданные значения активной и реактивной мощности;

ΔP^p - небаланс по активной мощности;

ΔQ^p - небаланс по реактивной мощности.

5. Анализ достижения заданной погрешности решения $\left|\Delta P^p\right|\le\varepsilon;\ \left|\Delta Q^p\right|\le\varepsilon$.

При выполнении этого условия рассчитанные, с учетом корректировки FC, значения мощностей

$$\begin{aligned}P_i(U^P;\Theta^p)&=\overline{P}_i(U^p)-P_{HHPi}(U^P;\theta^p);\\Q_i(U^P;\Theta^p)&=\overline{Q}_i(U^p)-Q_{HHPi}(U^P;\theta^p);\end{aligned},$$

формируются блоком 8, далее блоком 9 осуществляется вывод результатов расчёта оптимизированных параметров

$$P_i^{'}(U^{'(P)};\Theta^{'(p)});Q_i^{'}(U^{'(P)};\Theta^{'(p)});W_{opm}\to\min,$$

и расчет в данном периоде времени останавливается блоком10.

Если условие $\left|\Delta P^p\right|\le\varepsilon;\ \left|\Delta Q^p\right|\le\varepsilon$ не выполнено, то осуществляется переход к следующей операции - 6.

6. Вычисление корректирующих значений вектора активной и реактивной мощности с помощью FC:

$$\begin{cases}P_{HHPi}^{'}=P_{HHPi}(U^{(p+1)};\theta^{(p)+1});\\Q_{HHPi}^{'}=Q_{HHPi}(U^{(p+1)};\theta^{(p)+1});\end{cases},$$

где $P_{HHPi}^{'}, Q_{HHPi}^{'}$ - скорректированные вектора активной и реактивной мощности; $U^{(p+1)},\theta^{(p+1)}$ - амплитуда напряжения и сдвиг по фазе полученные в процессе корректировки.

7. Задание скорректированного значения вектора активной и реактивной мощности, полученных после повторной отработки НР

$$\begin{aligned}P_{HHPi}(U^{(P)};\Theta^{(p)})&=P_{HHPi}(U^{(p+1)};\Theta^{(p)+1});\\Q_{HHPi}(U^{(P)};\Theta^{(p)})&=Q_{HHPi}(U^{(p+1)};\Theta^{(p)+1});\end{aligned},$$

и последующий переход к операции 3.

При этом варьируются модуль, амплитуда напряжений и настройки FC, входящих в состав подсистем управления EPS.

Таким образом, реализация операций 3,6,7 предложенного алгоритма минимизации потерь активной мощности EPS, на основе FC, позволяет учитывать влияние неопределённых факторов на каждом шаге итерации оптимизационного расчета, кроме того, осуществляется постоянный анализ структуры элементов EPS.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

В результате имитационного моделирования СО и CS, включающей блок FC, были получены расчетные данные потерь активной мощности для узловой ES 110/220 кВ и для каждого их трех трансформаторов (соответствующих групп нагрузки), в

зависимости от напряжения в точках отпуска. Данные имитационного моделирования, для наглядности, представлены в графическом виде. На рис. 3 представлены три основных варианта: сплошной линией – сезонное регулирования напряжения (только два раза в год), пунктирной линией – существующее диспетчерское управление трансформаторным оборудованием (при использовании расчетно-аналитической методики и экспериментальных данных для определения типовых SLC) и пунктирной линией с точками – вариант применения FC для управление трансформаторным оборудованием. Для подтверждения эффективности применение блока нечёткого регулятора в CS трансформаторным регулировочным оборудованием ES, которая определена в результате имитационного моделирования, была использована упрощенная физическая модель EPS - лабораторный низковольтный комплекс. Натурное экспериментирование на данном комплексе подтвердило тенденцию и уровень снижения потерь активной мощности. Расхождение данных, по сравнению с имитационным моделированием, не превысило 16% [37].

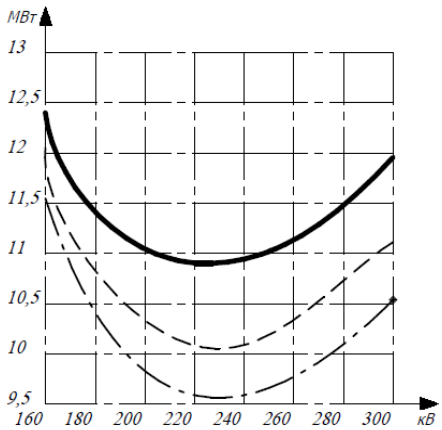


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности подстанции 110/220 кВ от уровня регулируемого напряжения.
Fig. 3. Dependence of active power losses of the 110/220 kV substation on the regulated voltage level.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- используемый в настоящее время алгоритм управления трансформаторным регулировочным оборудованием неполно учитывает реальные SLC, что является причиной дополнительных потерь активной мощности;
- применение блока нечёткого регулятора в CS трансформаторным регулировочным оборудованием ES более точно учитывает SLC и позволяет снизить погрешность их прогнозирования до величины порядка 1,5-3 % и, как следствие, величину потерь активной мощности в ES;
- величина дополнительного снижения потерь мощности при использовании блока нечёткого регулятора для трансформаторного оборудования узловой ES 110/220 кВ достигает (в зависимости от реализации существующего варианта регулирования напряжения на ES) 4,38% - 12,12%.

ЛИТЕРАТУРА (Reference)

[1] Olufemi M. O. *Minimization of power losses over electric power transmission lines.* LINES", B.Sc. (Benin), P.G.D. Eng. (Ado-Ekiti), M.Sc. (Ilorin) Nigeria, 2012, 119 p.

[2] Enesi A.Y., Tsado J., Mark N., Ahmed A. Power loss due to Corona on High Voltage Transmission Line. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2013, vol. 8, on. 3, pp. 14-19.

[3] Schweppe F.C. Power system static-state estimation. Part III: Implementation. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1970, vol.1.

[4] Shvedov G.V., Sipachyova O.V., Savchenko O.V. *Poteri elektroenergii pri eyo transporte po elektricheskim setyam: raschyot, analiz, normirovanie i snizhenie: uchebnoe posobie dlya vuzov.* [Electric power losses during its transportation through electric networks: calculation, analysis, rating and reduction: manual for higher education institutions] Moscow, Izdatel'skij dom MEI, 2013, 424 p.

[5] Kononov, F.A. D'yakov YU. G. [Opyt opredeleniya poter' elektroenergii na koronu i ispol'zovanie dinamiki ikh primeneniya dlya identifikatsii gololyodnykh obrazovanij na vozdushnoj linii elektroperedachi 330 kV]. *Trudy tret'ego Mezhdunarodnogo nauchno – prakticheskogo elektroenergeticheskogo seminara "Voprosy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii VL s uchyotom perspektivy povysheniya nadyozhnosti ikh raboty na sovremennom etape"*, [Materials of the third International scientific workshop dedicated to electric power topics "Design, construction and operation of the VL in prospect of increase of reliability of their perfor-

mance at the current stage"] Moscow, 2007, pp. 189-201.

[6] Vorotnitskij V.E., Zaslonov S.V., Kalinkina M.A., Parinov I.A., Turkina O.V. *Metody i sredstva rascheta, analiza i snizheniya poter' elektricheskoj energii pri ee peredache po elektricheskim setyam.* [Methods and means of calculation, analysis and reduction of electrical energy losses during its transportation through electrical systems.] Moscow, 2006. - 168 p.

[7] Glanzmann G. Flexible Alternating Current Transmission Systems. *Zurich, Power Systems Laboratory ETH.* 14. January 2005. 31p.

[8] Hingorani Narain G., Laszlo G. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems.* New York, Wiley-IEEE Press, 2000. 445 p.

[9] Arrillaga J., Woods G., Duke R.M. Thyristor-controlled in phase boosting for h.v.d.c. convertors. *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)* 1980, vol.127 pp. 221 – 227. doi: 10.1049/ip-c.1980.0035

[10] Debs AS, Larson RE. *A dynamic estimator for tracking the state of a power system.* IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, vol. 89, no. 7, pp.1670–1678.

[11] Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Pekarek S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE Press, 2013, p 680

[12] Anibal T. de Almeida, Bertoldi Paula. *Energy efficiency Improvements in Electric Motors and Drives.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. p 511.

[13] Monteleoni C., Schmidt G.A., Saroha S., Asplund, E. Tracking climate models. S*tatistical Analysis and Data Mining, 2011,* vol. 4, n. 4, pp. 372-392.

[14] Jiang X., Ling H., Yan J., Li B., Li, Z. Forecasting electrical energy consumption of equipment maintenance using neural network and particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering,* 2013.

[15] Alanis A. Y., Ricalde L. J., Simetti C., Odone, F. Neural model with particle swarm optimization kalman learning for forecasting in smart grids. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, pp.1- 9.

[16] Çevik H.H., Çunkaş M. Short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS. *Neural Computing and Applications*, 2015, vol. 26, no.6, pp.1355–1367.

[17] Shi B., Yu-Xia L I., Xin-Hua Y U. Short-term load forecast based on modified particle swarm optimizer and back propagation neural network model. *Journal of Computer Applications*, 2009, vol. 29, no. 4, pp. 1036-1039.

[18] Aiolfi M., Capistran C., C., Timmermann A. Forecast combinations. *Working Papers 201004, Banco de Mexico* 2010.

[19] AlRashidi M. R., El-Hawary M. E. A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 913-918.

[20] Taylor J. (2003) Short-Term Electricity Demand Forecasting Using Double Seasonal Exponential Smoothing. *Journal of Operational Research Society*, 2003, vol. 54, pp. 799-805.

[21] Cho H., Goude Y., Brossat X., Yao Q. Modeling and forecasting daily electricity load curves: a hybrid approach. *Journal of the American Statistical Association,* 2013, vol. 108, pp. 7-21.

[22] Devaine M., Gaillard, P., Goude, Y., Stoltz, G.: Forecasting electricity consumption by aggregating specialized experts. *Machine Learning,* 2013, vol. 90, no. 2, pp. 231-260.

[23] Eban E., Birnbaum A., Shalev-Shwartz, S., Globerson, A. Learning the experts for online sequence prediction. *Proceedings of ICML,* 2012.

[24] Roy L. Exact second order loadtlow. Proceedings 6-th PSCG. Darmstadt, 1978, pp. 711–718.

[25] Tinney W.F., Sato. Techniques for exploiting the spar-sity of the network admittance matrix. IEE Trans.Power Apparatus and Systems, 1963, vol. 82, no. 12.

[26] Tinney W.F. Wallker J.W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization. Proceedings IEEE, 1967, vol. 5, no. 55, pp. 1801–1899.

[27] Uemura K. Approximated Jacobians in Newton's power flow methods. Proceedings of the 4 PSCC, Grenoble, 1972.

[28] Nedellec R., Cugliari J., Goude Y. Electric load forecasting and backcasting with semi-parametric models. *International Journal of forecasting,* 2014 vol. 30, no. 2, pp. 375-381.

[29] Pierrot A., Goude Y. Short-term electricity load forecasting with generalized additive models. *Proceedings of ISAP power*, 2011, pp. 593-600.

[30] Mamdani E.H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *IEEE Trans. on Computer*, 1977. vol. 26, pp. 1182-1191.

[31] Simulink Design Optimization. [Simulink Design Optimization.] Available at https://www.mathworks.com/help/sldo/index.htm (accessed 2019)

[32] Kudinov YU.I., Kudinov I.YU., Suslova S.A. *Nechyotkie modeli dinamicheskikh protsessov* [Fuzzy models of dynamic processes.]. Moscow, 2007. 184 p

[33] Terano T., Asai K., Sugeno M. *Applied indistinct systems.* Tokyo, Omsya, 1989. (Russ. ed.: Tehrano T., Asai K., Sugeno M.. *Prikladnye nechyotkie sistemy.* Moscow, Mir, 1993. 368 p).

[34] Tehnk D., Hopfild D. Kollektivnye vychisleniya v nejropodobnyh ehlektronnyh skhemah. [Collective calculations in neurosimilar electronic schemes]. V mire nauki, 1988. no.2, pp. 45 – 53. (In Russian).

[35] Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. *Neuro – Control and its Applications*. London, Springer–Verrlag, 1996. (Russ. ed.: Sigeru Omatu, Marzuki Halid, Rubiya Yusof. *Nejroupravlenie i ego prilozheniya*. Moscow, IPRZHR, 2000. 272 p).

[36] Barinov V.A. *Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike* [Automation of dispatching controlling in electric power industry.]. Moscow, 2000. 647 p.

[37] Krysanov V.N. A physical model of power electronic devices based on static voltage transducers / V.N. Krysanov, V.L. Burkovskii, A.D. Danilov, A.M. Litvinenko, A.L. Rutskov // Russian electrical engineering. Allerton Press, Inc. – 2018. - V. 89(6). - P. 381–384.

Сведения об авторах.

Крысанов Валерий Николаевич, к.т.н., доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах. Область научных интересов - Аппаратные средства управления режимами электроэнергетических систем
E-mail: sovteh2000@mail.ru

Данилов Александр Дмитриевич, д.т.н., профессор кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах. Область научных интересов – Алгоритмы и модели АСУ
E-mail: danilov@yandex.ru

Бурковский Виктор Леонидович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах. Область научных интересов - Модели оптимального энергораспределения в системах энергоснабжения.
E-mail: bvl@vorstu.ru

Research of the Electric Power Conversion in Wind Turbines with the Aerodynamic Multiplication

Alekseevskiy D.G.[1], Andrienko P.D.[2], Nemykina O.V.[2]
[1]Zaporizhzhya National University,
[2]Zaporizhzhya National Technical University,
Zaporizhzhya, Ukraine

Abstract. The paper deals with the research of busbar power losses depending on electrical equipment installation and the dynamic change of the generated power of a wind turbine with the aerodynamic multiplication. The analysis of the electricity conversion electromechanical system is carried out on the example of the first Ukrainian pilot wind turbine with the aerodynamic multiplication of the TG-1000 type. The aim of the article is analytic method creation of analysis of power relative losses in busbars of electrical equipment depend on its arrangement, as well as the research of electromagnetic processes in the electromechanical system depend on the wind flow speed at the height axis of the turbogenerators setted on the blades of the wind wheel (WW) turbine by computer modelling method. This aim achieves by the rectifiers series connection and their location changing (generator clips), which allows the DC energy transfer inside the wind turbine. The research results have showed that power losses reduce in busbars and lead to increase wind turbine efficiency and decrease cable consumption. Electromagnet processes modelling of visual block model have evidenced the adequacy of the assumptions in the determination of the power losses. It has been obtained that the wind flow speed irregularity at the height axis of the turbogenerator and steering angle between turbogenerator axis and wind wheel rotation plane provokes the power generation variances, which pulse according to wind wheel rotation speed. In addition, balanced current of the circuit has provided the symmetrizing amplitudes of the power generator.
***Keywords*:** electromechanical system, wind turbine, aerodynamic multiplication, frequency converter, autonomous inverter, energy conversion, efficiency.
DOI: 10.5281/zenodo.2650423

Studiul schemelor de conversie a energiei electrice în instalații eoliene cu multiplicare aerodinamică

Alekseevski D.G.[1], Andrienko P.D.[2], Nemykina O.V.[2]
[1]Universitatea Națională din Zaporizhia,
[2]Zaporizhzhya Universitatea Tehnică Națională

Rezumat. Lucrarea este dedicată studierii pierderilor de putere în conductori în funcție de amplasarea echipamentului electric și de dinamica schimbărilor în puterea generată folosind un model vizual al blocului sistemului electromecanic al unei instalații electrice eoliene cu multiplicare aerodinamică. În acest scop, a fost efectuată o analiză a conversiei energiei electrice în prima centrală eoliană experimentală eoliană cu model multiplicativ aerodinamic TG-1000 la o viteză constantă a fluxului de vânt. Scopul lucrării este de a analiza circuitele electrice de plasare a echipamentelor electrice din punctul de vedere al reducerii pierderilor de putere în conductoare prin metode analitice, precum și studiul proceselor electromagnetice într-un sistem electromecanic utilizând metoda simulării în funcție de viteza fluxului de vânt la înălțimea axei turbogeneratoarelor amplasate pe palele turbinei eoliene ale instalației. Acest obiectiv se realizează prin schimbarea amplasării redresoarelor la bornele generatoarelor și a conexiunii lor în serie, ce permite transferul energiei în interiorul centralei eoliene la curent continuu. S-a constatat că pierderile de putere în conductoarele cu curent continuu se micșorează de 4,5 ori și ca rezultat contribuie la o creștere a randamentului (eficienței) turbinei eoliene cu mai mult de 1,1% și o reducere de 2,25 ÷ 4,5 oria a consumului de cablu în instalația eoliană. Se constată, că viteza inegală a fluxului de vânt la înălțimea axei turbogeneratoarelor față de sol și unghiul de rotație al axei turbogeneratoare față de planul de rotație al turbinei eoliene conduce la generarea inegală de putere care pulsează cu frecvența de rotație a turbinei eoliene.
Cuvinte-cheie: sistem electromecanic, instalație eoliană, multiplicare aerodinamică, convertizor de frecvență, invertor autonom, conversie de energie, eficiență.

© Алексеевский Д.Г., Андриенко П.Д., Немыкина О.В. 2019

Исследование схем преобразования электроэнергии в ветроэлектрических установках с аэродинамической мультипликацией

Алексеевский Д.Г.[1], Андриенко П.Д.[2], Немыкина О.В.[2]
[1]Запорожский национальный университет,
[2]Запорожский национальный технический университет,
Запорожье, Украина

Аннотация. Работа посвящена исследованию потерь мощности в токопроводах в зависимости от размещения электрооборудования и динамики изменения генерируемой мощности с использованием визуально-блочной модели электромеханической системы ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией. С этой целью проведен анализ преобразования электроэнергии в первой опытной украинской ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией типа ТГ-1000 при постоянной скорости ветрового потока. Целью работы является анализ электрических схем размещения электрооборудования с точки зрения снижения потерь мощности в токопроводах аналитическими методами, а также исследование электромагнитных процессов в электромеханической системе методом имитационного моделирования в зависимости от скорости ветрового потока на высоте оси турбогенераторов, расположенных на лопастях ветроколеса ветроэлектрической установки. Поставленная цель достигается изменением места расположения выпрямителей у зажимов генераторов и их последовательным соединением, что позволяет осуществлять передачу энергии внутри ветроэлектрической установки на постоянном токе. При этом установлено, что потери мощности в токопроводах постоянного тока снижаются в 4,5 раза и приводят к повышению КПД ветроустановки более чем на 1,1% и снижению расхода кабеля в 2,25÷4,5 раза. Результаты моделирования электромагнитных процессов на разработанной визуально-блочной модели показывают адекватность схем размещения оборудования. Установлено, что неравномерность скорости ветрового потока на высоте расположения осей турбогенераторов относительно земли и наличие угла разворота оси турбогенераторов относительно плоскости вращения ветроколеса приводит к неравномерной генерации мощности, которая пульсирует с частотой вращения ветроколеса, а наличие уравнительного тока в схеме приводит к симметрированию амплитуд генерируемой мощности. При пространственном сдвиге осей турбогенераторов на 120 градусов и симметрировании генерируемой турбогенераторами мощности в выходной мощности ветроустановки отсутствуют пульсации, кратные частоте вращения ветроколеса.

Ключевые слова: электромеханическая система, ветроэлектрическая установка, аэродинамическая мультипликация, преобразователь частоты, автономный инвертор, преобразование энергии, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на бурное развитие ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения лопастей и размещением генераторов на оси ветроколеса в зарубежной и отечественной практике рассматривают возможности использования ветроэлектрических установок с аэродинамической мультипликацией (Aerodynamic Multiplication) [1-15]. Ветроэлектрические установки с аэродинамической мультипликацией (ВЭУ АМ) обладают рядом существенных преимуществ в том числе:

-отсутствие механического мультипликатора, снижающего КПД ВЭУ до 5% [15];

-значительный момент инерции ветроколеса (ВК), связанный с размещением турбогенератов (ТГ) на лопастях ВК, что снижает пульсации генерируемой мощности.

В Украине созданы первые опытные образцы ВЭУ АМ типа ТГ-750 и ТГ-1000, которые подтверждают перспективность и возможности их практической реализации [6,13].

Конструктивные особенности ВЭУ АМ имеют отличие в размещении ее электрооборудования по сравнению со случаями, когда основное оборудование размещено в гондоле ВЭУ либо инверторная часть расположена в офшорной зоне и передача электроэнергии происходит на высоком напряжении 10-35кВ или на постоянном токе к месту установки инверторной подстанции.

Расположенные на лопастях ВК, турбогенераторы работают при различных воздействиях вращающего момента, который зависит от высоты их оси относительно земли при вращении ВК. Эта зависимость является следствием различной скорости ветрового потока на высоте, по температуре и влажности, а также угла разворота оси ТГ относительно плоскости вращения ВК [16].

В работах [17,18] проведен ряд исследований, направленных на повышение эффективности преобразования энергии в

ВЭУ АМ за счет оптимального выбора оборотов ТГ, использования схемы с переменной структурой, генераторов повышенной частоты. Однако вопросы потерь мощности в схемах преобразования и вопросы динамики работы ВЭУ АМ в отечественной и зарубежной литературе не освещены в достаточной степени.

Для исследования особенностей работы схем преобразования и поведения всей системы в динамике, которая в ВЭУ АМ имеет достаточно сложную многоканальную взаимосвязанную структуру необходимо иметь соответствующие модели.

Существующие модели, использующие причинно-следственные связи, разработаны для конкретных электромеханических систем [21-24] не могут быть использованы для исследования ВЭУ АМ в том числе для сравнительного анализа различных схем преобразования энергии ветра от количества их каналов и электрических схем преобразования.

Исследование потерь мощности в токопроводах в зависимости от размещения оборудования ВЭУ АМ и исследования процессов преобразования электроэнергии при помощи визуально-блочной имитационной модели приобретают актуальность.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТОКОПРОВОДАХ

На рис. 1 представлена функциональная схема преобразования энергии в ВЭУ АМ типа ТГ-1000. Ветроустановка имеет три ТГ мощностью 350кВт, напряжением 660В. В ВЭУ АМ турбогенераторы расположены на лопастях ветроколеса (ВК) на расстоянии 2/3 длины лопасти от оси ВК. Кольцевые токосъёмники (КТ) расположены на оси ВК и силовыми кабелями 150 мм^2 подключены к многоканальному преобразователю частоты (МПЧ), который расположен у основания башни ВЭУ АМ. Далее через трансформатор (ТР) МПЧ связан с сетью. В состав МПЧ входят 3 выпрямителя (1В-3В) с импульсными преобразователями повышающего напряжения (1ИППН-3ИППН), емкостный фильтр (Ф) и два трехуровневых инвертора (1АИН, 2АИН).

Передача энергии осуществляется тремя каналами трехфазного переменного тока, которые имеют 9 проводников токопровода.

Фазный ток генератора, работающего на выпрямитель, благодаря наличию индуктивности ИППН имеет практически прямоугольную форму, которая помимо основной гармоники содержит нечетные гармоники $n=6k\pm1$ порядка, где k-произвольное целое число [19].

На рис.2 представлены варианты схемы размещения выпрямителей МПЧ у зажимов ТГ, которые соединены последовательно.

Передача энергии осуществляется 4 проводниками токопровода постоянного тока. Величина передаваемого тока по основному каналу эквивалентна току в одном канале базового варианта (рис.1). Таким образом, передача энергии осуществляется меньшим количеством кабелей токопровода, что соответствуют уменьшению потерь мощности в токопроводах. Для оценки потерь мощности проведено сравнение потерь мощности в токопроводах постоянного и переменного токов.

Потери мощности в одной фазе токопровода переменного тока в условиях генерации высших гармоник составляют [20]:

$$\Delta\Sigma P = \left(\Delta P_1 + \sum\nolimits_{k=1}^{n=6k\pm1} \Delta P_n\right) = \\ = \left((I_1)^2 R_{\omega 1} + \sum_{k=1}^{n=6k\pm1} (I_n)^2 \cdot R_{\omega n}\right) \quad (1)$$

где I_1, I_n – расчетное значение тока первой и гармоник n-порядка; $R_{\omega 1}, R_{\omega n}$ – активное сопротивление токопровода переменному току для первой гармоники и гармоник n-порядка, соответственно.

Потери мощности в одном полюсе токопровода постоянного тока с учетом соотношения фазного и выпрямленного токов:

$$\Delta P_d = (I_0)^2 R_0 = \frac{3}{2}(I_1)^2 R_0 \quad (2)$$

где $I_0 = I_1/\sqrt{2/3}$ – выпрямленный ток выпрямителя; R_0 – омическое сопротивление токопровода.

В относительных единицах соотношение потерь в жилах кабеля переменного и постоянного тока с учетом (1) и (2) имеет следующий вид:

$$\Delta P^*_{\Sigma} = \frac{\Delta \Sigma P}{\Delta P_d} = \\ = \frac{2}{3} K_{\omega 1} \left(\left(\frac{1}{\cos \varphi_1} \right)^2 + \sum_{k=1}^{n=6k\pm1} K_{\omega n} \cdot \left(I^*_n \right)^2 \right), \quad (3)$$

где $I^*_n = I_n / I_0; K_{\omega n} = R_{\omega n} / R_{\omega 1};$ $K_{\omega 1} = R_{\omega 1} / R_0; \cos \varphi_1 -$ коэффициент мощности основной (первой) гармоники.

Значение $\cos \varphi_1$ определяется углом коммутации (γ) выпрямителей. Для возможных углов коммутации γ =0÷30°.

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) = 1 \div 0{,}96. \quad (4)$$

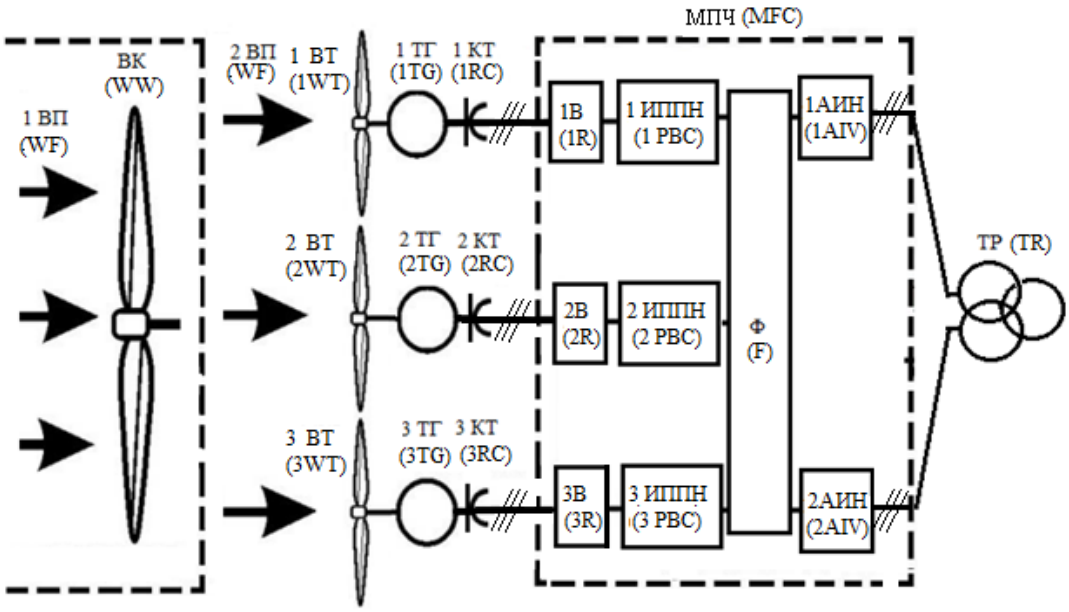
Величина $K_{\omega n}$ зависит от конструкции кабеля, влияния вихревых токов и эффекта близости. Для практических расчетов значение $K_{\omega 1}$ может быть найдено из соотношения допустимых значений переменного и постоянного тока исходя из условия равенства потерь $R_{\omega 1} \cdot I_{m1}{}^2 = R_0 I_{m0}{}^2$, определяющих температурный режим кабеля.

$$K_{\omega 1} = \frac{R_{\omega 1}}{R_0} = \left(\frac{I_{m0}}{I_{m1}} \right)^2 = \left(\frac{470}{440} \right)^2 = 1{,}14 \quad (5)$$

где $I_{m1}, I_{m0} -$ максимальное значение переменного тока и выпрямленного тока.

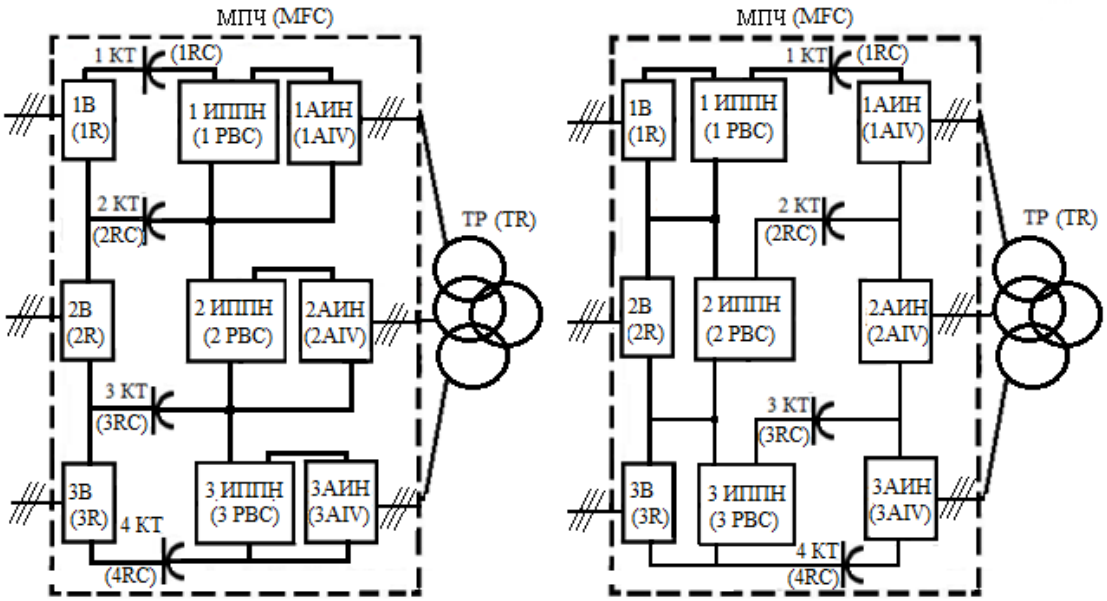
Относительное значение токов высших гармоник обратно пропорциональны относительной частоте f^*_n, где n=6k±1 [19]. Полагая, что относительное значение активного сопротивления токопровода для гармоник n–порядка, с достаточной для практики точностью пропорциональны $\sqrt{f^*_n} \approx K_{\omega n}$ [19], относительные потери мощности в одножильном кабеле, определяются соотношением:

$$\Delta P^*_{\Sigma} = \frac{2}{3} \cdot K_{\omega 1} \left(\cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} + \sum_{k=1}^{n=6k\pm1} \cdot \frac{\sqrt{f^*_n}}{\left(f^*_n \right)^2} \right), \quad (6)$$



1 ВП,2 ВП – ветровой поток (1WF,2WF - wind flow); ВК – ветроколесо (WW - wind wheel); 1ВТ,2ВТ,3ВТ — ветротурбины, (1WT,2WT,3WT wind turbines); 1ТГ,2ТГ,3ТГ- туброгенераторы (1TG,2TG,3TG - turbogenerators); 1КТ,2КТ,3КТ - кольцевые токосъёмники (1RC,2RC,3RC - ring collectors);1В,2В,3В – выпрямители (1R,2R,3R - rectifiers);1 ИППН,2 ИППН, 3 ИППН – импульсные преобразователи повышающего напряжения (1PBV, 2PBC, 3PBC - pulse DC/DC boost converter); Ф- фильтр (F - filter);1АИН,2АИН – автономные инверторы напряжения (1AIV,2AIV - autonomous inverter voltages); ТР- трансформатор (TR - transformer);МПЧ- многоканальный преобразователь частоты (MFC- multichannel frequency converter).

Рис. 1. Функциональная схема преобразования энергии в ВЭУ АМ типа ТГ-1000.
(Fig. 1. Functional scheme of energy conversion in wind turbines AM type TG-1000).



а б

Рис.2. Функциональные схемы преобразования энергии с последовательным соединением выпрямителей ВЭУ АМ.
(Fig.2. Functional schemes of energy conversion with serial rectifiers' connection of wind turbines AM).

где $f_n^* = f_n / f_1$– относительная частота гармоники n– порядка; f_n, f_1 – частота гармоники n– порядка, частота и основной гармоники, соответственно.

При принятых допущениях относительное значение потерь с учетом суммы ряда (6) $n \leq 40$ ΔP^*_Σ =0,93÷1,015.

Таким образом, в одножильном кабеле принятого типа при одинаковой величине активного тока выпрямителя потери мощности на переменном токе с учетом потерь от высших гармоник практически равны потерям мощности выпрямленного тока.

Суммарные относительные потери зависят от соотношения жил кабеля на переменном и постоянном токе.

Следовательно, конструкция токопроводов и размещение оборудования ВЭУ АМ при передаче электроэнергии должно обеспечивать максимальное значение этого соотношения.

Расчеты по соотношению (3) дают следующие результаты.

В базовом варианте в номинальном режиме потери мощности в токопроводах переменного тока при номинальной мощности составляют 15,6 кВт, что снижает КПД ВЭУ АМ на 1,56%. При ветровых потоках менее 5м/с потери мощности снижаются до 7,3 кВт, что уменьшает КПД на 2,5%.

Использование схемы (рис. 2а) позволяет снизить расход кабелей в 2,25 раза (225 м) и снизить потери примерно в 4,5 раза, поскольку основной генерируемый ток проходит по двум крайним кабелям (1КТ и 4КТ), а по двум кабелям (2КТ и 3КТ) протекает уравнительный ток, модулированный частотой вращения ВК с амплитудой не более 5,5А (рис.6.). За счет снижения потерь в токопроводах КПД ВЭУ АМ возрастает на 1,1% в номинальном режиме и более чем 4,9% при малых ветровых потоках. Использование в схемах (рис. 2 а, б) трех двухуровневых инверторов меньшей мощности вместо двух трехуровневых существенно не влияет на изменение цен МПЧ, улучшая при этом электромагнитную совместимость.

На рис. 3 представлена схема с использованием активных выпрямителей (АВ), что позволяет снизить расход кабеля по сравнению с базовым вариантом в 4,5 раза (≈450 м) и снижения потерь за счет исключения потерь в импульсном преобразователе и от уравнительных токов.

Схема позволяет реализовать многофазное инвертирование и обеспечить электромагнитную совместимость ВЭУ АМ с сетью, возможность реализации

резервирования и, следовательно, надежности схемы.

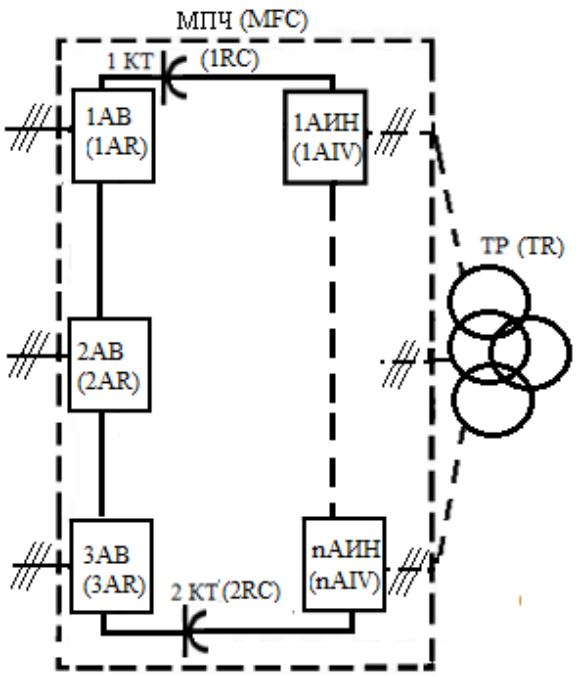


Рис.3. Функциональная схема преобразования энергии с последовательным соединением активных выпрямителей ВЭУ АМ.
(Fig.3. Functional scheme of the energy conversion with serial active rectifiers' connection of the wind turbine AM).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ

Для исследования электромеханических процессов ВЭУ АМ типа ТГ-1000 в работе была использована ее визуально-блочная модель (ВБМ), которая представлена на рис.4. ВБМ является развитием подхода к синтезу визуальных моделей многоканальных ветроэнергетических систем с аэродинамическим мультиплицированием [25,26]. Модель реализуется в среде Matlab/Simulink. Структура модели представляет электромеханическую систему ВЭУ АМ, как тракт преобразования мощности.

Каждый элемент ВБМ является стандартным блоком, взятым из библиотеки компонентов и отражает определенную энергетическую функцию: преобразования, накопления или распределения энергии внутри электромеханической системы. Данный подход к построению модели позволяет представить математическую модель в едином базисе, в котором связи между элементами соответствуют причинно-следственным связям, и полностью абстрагированы от их физической природы.

С точки зрения структуры преобразования мощности ВЭУ АМ представляет собой многоканальный энергетический тракт. Разделение потоков мощности происходит на уровне первичного воздушного потока, за счет небольшого разворота вторичных ветротурбин (ВТ) относительно плоскости, вращения первичной ВТ, а также на уровне вторичного воздушного потока, где механическая энергия вращения первичной ВТ распределяется между тремя вторичными ВТ. Далее энергия подвергается преобразованию в трех параллельных трактах, которые включают в себя: вторичную ВТ, генератор, неуправляемый выпрямитель, ИППН, АИН и соответствующие емкостные и индуктивные фильтры. Консолидация же потоков мощности, в рассмотренной схеме, происходит на уровне сети.

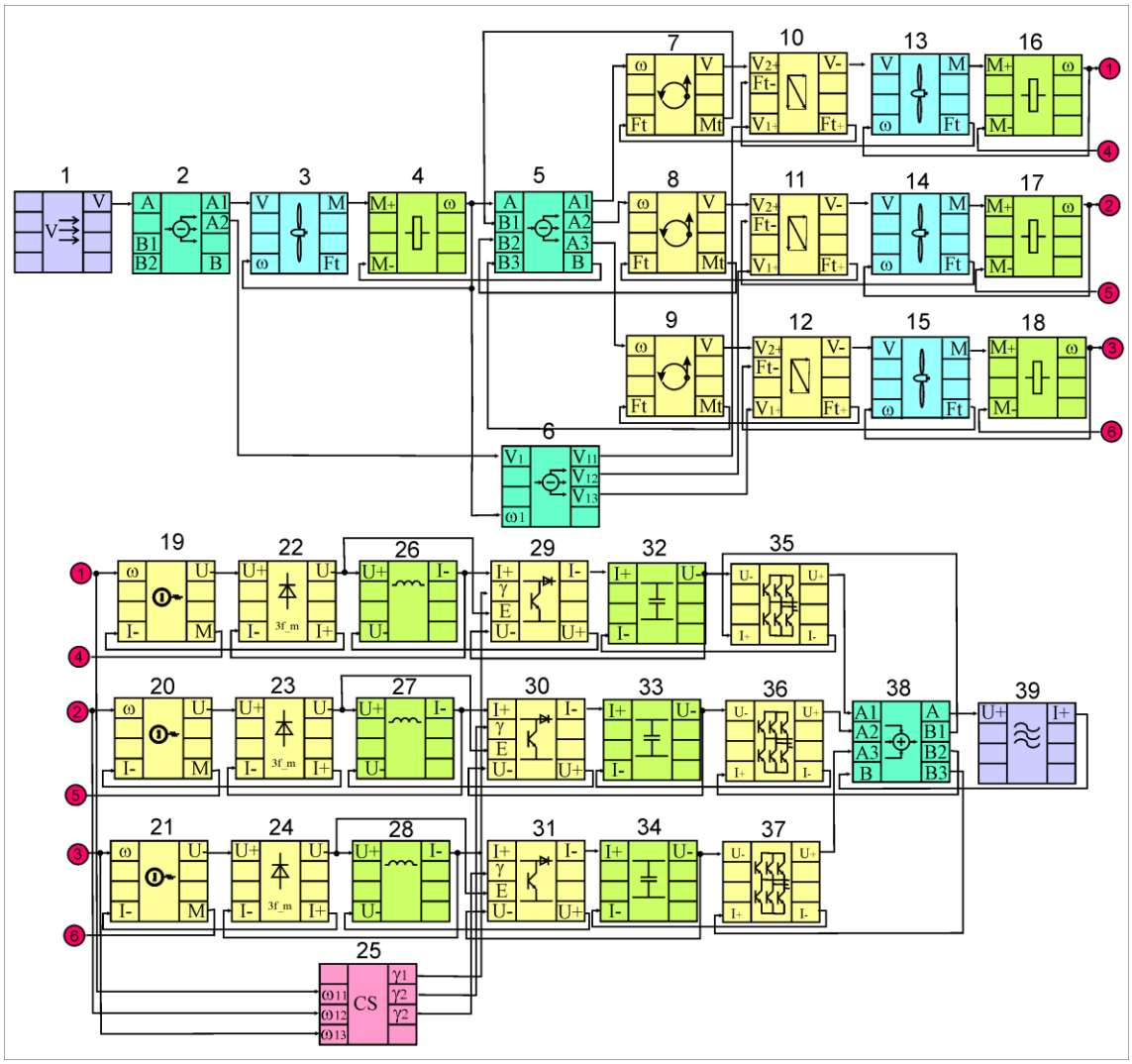
С помощью рассмотренной модели были проведены исследования влияния динамики работы ВЭУ на величину средних значений токов во втором (2КТ) и третьем (3КТ) токосъемных узлах.

При идентичности электромеханических процессов в трех каналах преобразования мощности, в этих узлах системы токи вообще отсутствуют. Однако, в реальной системе, это условие не выполняется.

Причиной этого является то, что вследствие небольшого разворота осей вторичных ВТ относительно плоскости вращения первичной ВТ, вторичные ВТ взаимодействуют не только с вторичным воздушным потоком, но и с первичным ветром.

При этом его скорость существенно различается на разных высотах. В результате этого мощности на валу генераторов в любой текущий момент времени различаются.

Следствием этого является появление некомпенсированных токов во втором (2КТ) и третьем (3КТ) токосъемных узлах (рис.5). На рис.5 представлены осциллограммы токов через токосъемники 1КТ и 4КТ (I_1,I_4) и 2КТ и 3КТ (I_2,I_3), и выходной мощности ТГ (P_1,P_2,P_3).



1 – первичный воздушный поток (primary air flow); 2 - распределитель мощности первичного воздушного потока между первичной и вторичными ветротурбинами (power distributor of the primary air flow between the primary and secondary type wind turbines); 3 – первичная ветротурбина (primary type wind turbine); 4 – вращающиеся массы на валу первичной ветротурбины (rotating masses of the shaft of the primary type wind turbine); 5 - распределитель мощности первичной ветротурбины между вторичными (power distributor of the primary type wind turbine between the secondary ones); 6 - распределитель потока мощности первичного ветрового потока между вторичными ветротурбинами (power distributor of primary type wind flow between secondary type wind turbines); 7, 8, 9 – преобразователи энергии вращательного движения в энергию поступательного (rotary motion energy converters to translation energy); 10, 11, 12 – блоки модели, суммирующие мощность первичного и вторичного воздушного потока, при развороте осей вторичных ветротурбин (model blocks that summarize the power of the primary and secondary air flows taking into account the axes of secondary type wind turbines is steered); 13, 14, 15 – вторичные ветротурбины (secondary type wind turbines); 16, 17, 18 – вращающиеся массы на валу первичной ветротурбины (rotating masses of the shaft of primary type wind turbine); 19, 20, 21 – синхронные генераторы (synchronous generators); 22, 23, 24 – трехфазные неуправляемые мостовые выпрямители (three-phase uncontrolled bridge-type rectifiers); 25 – система управления скоростью генераторов (generator speed control system); 26, 27, 28 – индуктивные фильтры (inductive filters); 29, 30, 31 – импульсные преобразователи постоянного напряжения повышающего типа (pulse DC/DC boost converter); 32, 33, 34 – емкостные фильтры (capacity filters); 35, 36, 37 – автономные инверторы напряжения (autonomous voltage inverter); 38 – блоки модели, объединяющие мощность трех каналов в один поток (model block that join the three power channels); 39 – электрическая сеть (power supply network).

Рис.4. Визуально-блочная модель электромеханической системы ВЭУ АМ.
(Fig.4. Visual-block model electromechanical system of the wind turbine AM).

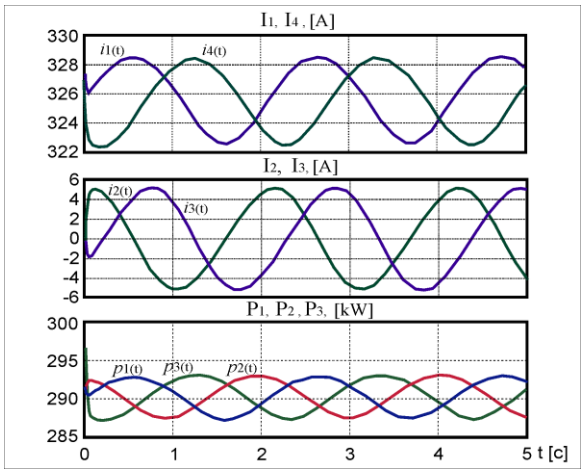


Рис.5. Осциллограммы токов и мощности, ВЭУ АМ в установившимся режиме.
(Fig.5. Currents and power oscillograms for the wind turbine AM at the steady state).

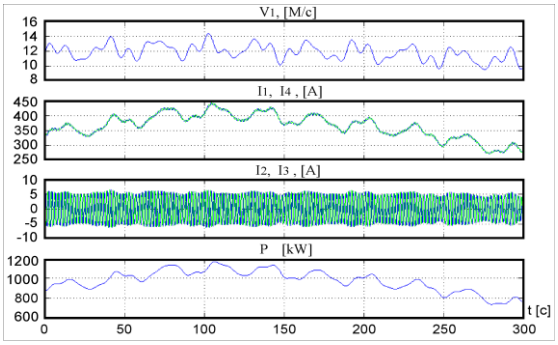


Рис. 7. Осциллограммы скорости, токов через токосъемные узлы и выходной мощности
ВЭУ с АМ при переменной скорости ветрового потока.
(Fig. 7. Oscillograms of speed, currents through collector units and output power of wind turbines with AM at a variable speed of wind flow).

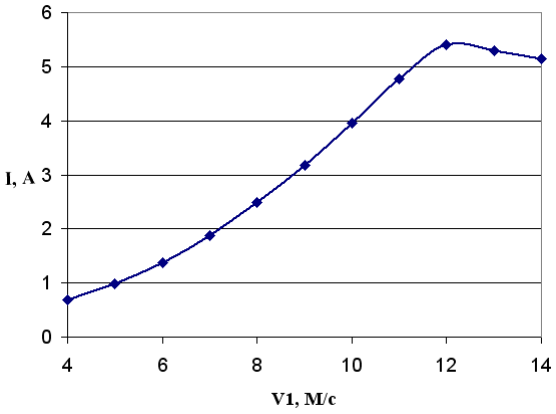


Рис.6. Зависимость величины токов в токосъемных узлах 2КТ и 3КТ от средней скорости ветрового потока на высоте оси ВК.
(Fig.6. The dependence of the currents' magnitude in the collector nodes 2KT and 3KT from the average speed of the wind flow at the height of the axis wind wheel).

На осциллограммах видны пульсации мощности ТГ в каждом канале и результирующего (уравнительного тока) в токопроводах 2КТ и 3КТ с частотой вращения ВК. Наличие уравнительного тока между каналами приводит к симметрированию мощностей каждого ТГ.

Сдвиг фаз на 1/3 периода при равенстве амплитуд пульсаций мощности ТГ обеспечивает постоянство суммарной генерируемой мощности при постоянстве скорости ветрового потока ВК.

На рис.6 представлена зависимость величины токов в токосъемных узлах 2КТ и 3КТ от средней скорости ветрового потока на высоте оси ВК. Спад характеристики связан с падением генерируемой мощности при скорости ВП выше номинальной (12 м/с). Результаты моделирования подтверждают принятые ранее допущения о незначительном влиянии уравнительного тока на потери мощности токопроводах 2КТ и 3КТ.

На рис. 7 приведены результаты моделирования токов через токосъемные узлы ВЭУ с АМ в условиях динамического изменения скорости ветрового потока.

Результаты моделирования подтверждают вывод, что характер зависимости, приведенной на рис. 6 сохраняется и в условиях электромеханического переходного процесса.

ВЫВОДЫ.

1. Получено аналитическое соотношение, позволяющее оценить относительные потери мощности в токопроводах постоянного и переменного токов в ВЕУ АМ.

2.Конструктивное изменение расположения электрооборудования для реализации передачи электроэнергии на постоянном токе позволяет:

- снизить потери мощности в токопроводах постоянного тока в 4,5 раза по сравнению с переменным и повысить КПД на 1,1÷4,9 % в зависимости от режима работы ВЭУ АМ и варианта размещения электрооборудования;

- снизить расход в 2,25÷4,5 раза кабельной продукции;

-упростить конструкцию кольцевых токосъёмников, и, следовательно, снизить себестоимость ВЭУ АМ и повысить энергоэффективность ВЭУ АМ.

3.Разработанная визуально-блочная модель электромеханической системы ВЭУ АМ позволяет исследовать сложные структуры, присущие для рассматриваемых систем.

4. Методом моделирования установлено, что наличие уравнительного тока, вызванного несимметричным воздушным потоком на уровне осей ТГ способствует симметрированию их генерируемых мощностей и поддержанию постоянства выходной мощности.

Литература (References)

[1] Madsen H. A., Rasmussen F. Wind turbine having secondary rotors. Patent EP, no. EP1390615, 2008.

[2] Hutter U. Wind-driven power plant. Patent US, no. US 4197056, 1980.

[3] William K. Watson. Space frame wind turbine. Patent US, no. US4735552, 1988.

[4] St-Germain J. Wind machine with electric generators and secondary rotors located on rotating vertical blades. Patent US, no. US5151610, 1992.

[5] Madsen H. A., Flemming R. Wind turbine having secondary rotors. Patent WO, no. WO2002086312, 2002.

[6] M.S. Golubenko, S.I. Dovgolyuk, A.L. Kadatskiy, S.D. Kurdyukov, A.M. Feldman, V.A. Tsygnaov. Wind power plant. Patent UA, no. EP2045463, 2009.

[7] Jamieson P. Innovation in wind turbine design // John Wiley & Sons, Ltd, 2011. — 299 p.

[8] Arifujjaman, M. Power Electronics Reliability Comparison of Grid Connected Small Wind Energy Conversion Systems. Wind Engineering Volume 35, NO. 1, 2011.

[9] Feldman Alexander. Vertical axis sail bladed wind turbine. Patent US, no. US5171127A, 1992.

[10] William E. Heronemus. VERTICAL ARRAY WIND TURBINE. Patent US, no. USOO6749399B2, 2004.

[11] Klippe F. Van D. Wind energy conversion device. Patent NL, no. NL1013380C2, 2001.

[12] Todman M. T., Carew Armstrong J. R.. Multi rotor wind turbine. Patent GB, no. GB2443886A, 2008.

[13] Golubenko N. S., Dovgalyuk S. M., Feldman A. M., Tsyganov V. A. [Trends in the development of wind energy and non-multiplicative wind installations]. *Trudy DVNS «Netraditsionnaya energetika XXI veka»* [Proc. of the IV International Conference ["Alternative Energy of the 21st Century"]. - Crimea, Gurzuf. - 2003. - pp. 68–74. (In Russian).

[14] Tsgoev R.S. Matematicheskoe modelirovanie aerodinamicheskih harakteristik vetrokolesa [Mathematical modeling of wind wheel aerodynamic characteristics]. *Elektrotehnika Electrical Engineering,* 2009. - no.11, pp. 47-52. (In Russian).

[15] Tsgoev, R. S. Sravneniye rezhimnykh vozmozhnostey vetroenergeticheskikh ustanovok [Comparison of wind power facilities]. *Elektrotehnika - Electrical engineering,* 2007, no.12, pp. 32–38. (In Russian).

[16] Baring-Gould and D. Corbus Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates The Arctic Energy Summit Technology Conference Anchorage, Alaska October 15–18, 2007.- pp. 3–7.

[17] Nemudry I.Yu. Povyishenie effektivnosti preobrazovaniya energii v VEU s aerodinamicheskoy multiplikatsiey [Improvment the efficiency of energy conversion in wind turbines with aerodynamic multiplication]. *ElektrotehnIka ta elektroenergetika –Electrical engineering and power engineering*.– 2014, no.1. – pp. 79-85. (In Russian).

[18] Golubenko N.S., Andrienko P.D, Nemudryy I.Yu. Modelirovanie elektromehanicheskoy sistemyi VEU s aerodinamicheskoy multiplikatsiey v rezhime stabilizatsii skorosti vrascheniya vetroturbin [Modeling of an electromechanical system of a wind turbine with aerodynamic multiplication in the operation of stabilization of speed and rotation of wind turbines]. *ElektrotehnIka ta elektroenergetika – Electrical engineering and power engineering*.– 2011. – no1, pp.. 70-74. (In Russian).

[19] Makarov E.F *Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV:T.4* [Handbook of electric networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV: T.4*/pod red. I. T. Goryunova i A. A. Lyubimova*] / ed. I.T. Goryunova and A.A. Lyubimov. – Moscow Papyrus PRO Publ., 2005. 637 p. (In Russian).

[20] Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva i ih kontrol na promyishlennyih predpriyatiyah* [Quality Indicators and Their Control at Industrial Enterprises] Moscow, Energoatom. Publ., 2000. 252 p. (In Russian).

[21] Leclercq A., Sicard P., Bouscayrol A., Lemaire-Semail B., "Control of a triple drive paper system based on the Energetic Macroscopic Representation" Ajacci, IEEE-ISIE'04. Publ., 2004, pp. 889-893.

[22] Wankam D., Sicard P., Bouscayrol A. "Maximum control structure of a five-drive paper system using Energetic Macroscopic

Representation," [Proc. of the Special Session Graphical Description for Modeling and Control Power Systems] Paris,IEEE IECON Publ., 2006, pp.5332-5337.

[23] Chen K., Bouscayrol A., Lhomme W., "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Applicationto an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, June, Osaka, Publ., 2008, pp. 1097-1102.

[24] Bouscayrol A., Hautier J. P., Lemaire-Semail B., "Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic Systems", [Systemic Design Methodologies for Electrical Energy, tom 1, Analysis, Synthesis and Management] Ajacci, ISTE, Publ., 2012 ,pp. 535-546

[25] Alekseevskiy D., Pankova O., Khrestin R., "Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes"// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2018, no. 6/9(96), pp. 48-54.

[26] Alekseevskiy D. Vizualnoe modelirovanie mnogokanalnyih vetroelektrogeneriruyuschih sistem. [Visual modeling of multichannel wind power generating systems]. Visnik natsionalnogo tehnichnogo universitetu "Harkivskiy politehnichniy Institut". - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".– 2017, no.27(1249), pp. 332-336. (In Russian).

Сведения об авторах.

Алексеевский Дмитрий Геннадиевич – к.т.н, доцент, доцент каф. электронных систем инженерного института Запорожского национального университета, Украина. Область научных интересов связана с электромеханическими системами ветроэнергетических установок. E-mail: lasian2017@ukr.net

Андриенко Петр Дмитриевич – д.т.н., профессор, зав. каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина. Область научных интересов связана с силовыми полупроводниковыми преобразователями.
E-mail: andrpd@ukr.net

Немыкина Ольга Владимирова – к. т. н., доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий Запорожского национального технического университета, Украина. Область научных интересов связана с альтернативными источниками энергии.
E-mail: olganemikina@ukr.net

Improving Heat Exchange Systems of Turbogenerators for Increase of their Efficiency

Minko A.N.[1], Shevchenko V.V.[2]
[1]PRD company «Ankor-Teploenergo»,
[2]National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute»
Kharkov, Ukraine

Abstract. The goal of this work is to define parameters that characterize turbogenerator heat exchanger efficiency and to develop recommendations for its increase by improving the heat exchanger design in different modes and ranges of electromagnetic loads for different cooling medium types (air, hydrogen, water). The paper uses the results of studies of the thermal state of turbogenerators of foreign and domestic authors, where it is noted that the global economic crisis has complicated the possibility of timely replacement of turbine generators that have expired, therefore partial replacement and/or modernization is most often used. At the same time, in all the electrical engineering plants of the world, the task of increasing the power of turbogenerators is solved without changing their dimensions, which is possible only with the improvement of cooling systems. Therefore, the outer dimensions of the heat exchanger and its connection node to the turbogenerator were preserved in our studies. Gas coolers with different sections and moves number of cooling medium and heat-removing elements arrangement were reviewed. Data of TGV-200-550, TA-35-120 turbogenerators were used in calculations. The regime coefficients, that allow to consider the type of cooling medium, thermophysical parameters, temperature changes, coolant rate, inlet cooler pressure, number of gas strokes inside the heat exchanger, cooler tubes' heat exchange surface area and finning type were introduced. The heat exchanger thermal stresses were determined depending on the cooler tubes' geometry and heat exchange surface area in the working temperature range.
***Keywords*:** turbogenerator, cooling system, heat exchanger efficiency, mode parameter, electromagnetic loads, optimal layout.
DOI: 10.5281/zenodo.2650425

Îmbunătățirea sistemelor de schimb de căldură ale turbogeneratoarelor în scopul creșterii eficienței acestora

Minko A.N.[1], Shevchenko V.V.[2]
[1]ChNPP "Ankor-Teploenergo",
[2]Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic Kharkiv"
Kharkov, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei lucrări este de a determina parametrii care caracterizează eficiența schimbătorului de căldură al turbogeneratorului și de a elabora recomandări pentru îmbunătățirea acestuia prin îmbunătățirea designului și a dispunerii interne a schimbătorului de căldură în diferite condiții de funcționare, banda de schimbare a sarcinilor electromagnetice pentru diferite tipuri de medii de răcire (aer, hidrogen, apă). Lucrarea folosește rezultatele studiilor privind starea termică a de turbogeneratoarelor obținute de cercetătorii din străinătate, precum și de cercetătorii din țară. Se menționează, că criza economică mondială a condus la dificuștăți privind înlocuirea în timp util a turbogeneratoarelor la care a expirat timpul de exploatare, de aceea, cel mai frecvent se utilizează opțiunea de înlocuirea parțială și / sau modernizare. În același timp, la toate întreprinderile constructoare de mașini electrice din lume, problema de majorare a puterii de generare turbogeneratoarelor este rezolvată fără a schimba dimensiunile lor, ceea ce este posibil numai prin îmbunătățirea sistemelor de răcire. Urmare a acestei tendințe, studiile noastre au fost realizate cu condiția conservării dimensiunilor exterioare ale schimbătorului de căldură și a conexiunii sale cu turbogeneratorul. Au fost luate în considerare modelele de răcitoare de gaz cu un număr diferit de secțiuni și direcții de curgere ale mediului de răcire (gaz sau apă), cu un aranjament diferit ale elementelor de cedare a căldurii. S-au propus coeficienți de regim și geometrici care permit luarea în considerare tipul mediului de răcire și parametrii lui termofizici, intervalul de variație a temperaturii și debitul de lichid de răcire, presiunea de admisie la răcitor, etc.
Cuvinte-cheie: turbogenerator, sistem de schimb de căldură, eficiență schimbătorului de căldură, parametru de funcționare, sarcini electromagnetice, amplasament optim.

© Минко А.Н., Шевченко В.В., 2019

Совершенствование теплообменных систем турбогенераторов с целью повышения их эффективности

Минко А.Н.[1], Шевченко В.В.[2]
[1]ЧНПФ «Анкор-Теплоэнерго»,
[2]Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Харьков, Украина

Аннотация. Целью настоящей работы является определение параметров, характеризующих эффективность работы теплообменника турбогенератора, и разработка рекомендаций по ее повышению за счет совершенствования конструкции и внутренней компоновки теплообменника при разных режимах эксплуатации, диапазонах изменения электромагнитных нагрузок при разных видах охлаждающей среды (воздух, водород, вода). В работе использованы результаты исследований теплового состояния турбогенераторов зарубежных и отечественных авторов, где отмечено, что мировой экономический кризис усложнил возможность своевременной замены турбогенераторов, отработавших срок эксплуатации, поэтому наиболее часто применяется частичная замена и/или модернизация. При этом на всех электромашиностроительных заводах мира задачу повышения мощности турбогенераторов решают без изменения их габаритов, что возможно только при совершенствовании систем охлаждения. Поэтому наши исследования выполнялись с условием сохранения наружных габаритов теплообменника и узла его соединения с турбогенератором. Были рассмотрены конструкции газоохладителей с разным числом секций и ходов движения охлаждающей среды (газа или воды), с различным расположением теплоотводящих элементов. Все расчеты выполнялись на базе турбогенераторов ТГВ 200-550 и ТА 35-120. Были предложены режимные и геометрические коэффициенты, которые позволяют учитывать вид охлаждающей среды и ее теплофизические показатели, диапазон изменения температуры и расход теплоносителя, давление на входе в охладитель, число ходов газа внутри теплообменника, площадь теплообменной поверхности трубок охладителя и вид их оребрения. Получены значения тепловых напряжений в корпусе теплообменников в зависимости от геометрии трубок охладителя и площади их поверхности на рабочем интервале температур. В результате исследований была достигнута поставленная в работе цель: получены режимные коэффициенты, которые могут служить критерием эффективности отвода тепла в теплообменнике при разных электромагнитных нагрузках турбогенераторов, при разных рабочих температурах и видах охлаждающей среды.

Ключевые слова: турбогенератор, теплообменная система, эффективность теплообменника, режимный параметр, электромагнитные нагрузки, оптимальная компоновка.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос охлаждения мощных электрических машин (ЭМ), в частности турбогенераторов (ТГ), всегда был актуальным, т.к. возможность увеличения мощности в единице исполнения на всех этапах развития электромашиностроения определялась уровнем развития систем охлаждения. Мировой экономический кризис существенно затрудняет выполнение замены электрооборудования, которое отработало паспортный срок эксплуатации. Поэтому на всех тепловых, в том числе и атомных, электростанциях мира обычно проводят только частичную замену и/или модернизацию изношенного оборудования, [1—17]. При этом во всех исследованиях ставится задача повышения мощности ТГ в единице исполнения без изменения его габаритов, что возможно только при совершенствовании систем охлаждения. В проведенных исследованиях рассмотрены номинальные режимы работы ТГ и работа с кратковременными перегрузками, вызванных аварийными отключениями работающих рядом на ту же энергосистему ТГ. В настоящее время для компенсации дневных пиков и ночных провалов энергопотребления в течение суток ТГ маневренного диапазона мощности (200—550 МВт с водородным и водородно-водяным охлаждением, 60—120 МВт с полным воздушным охлаждением) дважды переводят в неноминальные режимы, что отрицательно сказывается на их надежности. Исследования особенностей работы ТГ в постоянно повторяющихся переходных режимах практически не проводились. Увеличение мощности при модернизации ТГ приводит к увеличению их электромагнитных нагрузок, к увеличению потерь и, соответственно, тепла, которое нужно отводить из внутреннего объема ТГ. Наши исследования показали, [5, 6], что при частой работе в неноминальных режимах снижается надежность не только элементов конструкций ТГ, но и всех обеспечивающих систем, в том числе и теплообменников. К современным мировым тенденциям

турбогенераторостроения также следует отнести замену в ТГ мощностью до 300—350 МВт водорода, как охлаждающей среды, на воздух, что требует совершенствования систем охлаждения. Поэтому исследования работы теплообменных систем ТГ актуальны и имеют практическую направленность.

В ТГ используется воздушное, водородное и комбинированное охлаждение: водяное охлаждение обмотки статора и газовое охлаждение сердечника статора, ротора и внутреннего объема машины. Вопросам анализа, расчета, проектирования наиболее распространенных видов систем охлаждения мощных ТГ посвящены работы многих исследователей, [1—4, 7—26]. Также следует отметить исследования, посвященные моделированию теплообменных процессов и особенностям проектирования и оптимизации работы теплообменного оборудования электрических машин, где приводятся результаты анализа теплового состояния ТГ в зависимости от выбранной системы охлаждения и типа теплоносителя, [16—19, 23]. Многие работы посвящены совершенствованию диагностики теплового состояния современных ТГ, особенностям проведения ремонтов и модернизации ТГ в состоянии износа, [5—7, 21, 24]. Но комплексного исследования влияния электромагнитных нагрузок, режима работы, внутренней компоновки, типа охлаждающей среды ТГ на эффективность работы теплообменного узла, проведено не было.

Поэтому целью настоящей работы стала разработка рекомендаций по повышению эффективности работы теплообменников ТГ с учетом особенностей их эксплуатации, диапазона изменения электромагнитных нагрузок при использовании разных типов охлаждающей среды (воздух, водород, вода).

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методы исследования. Определение эффективности работы теплообменного узла мощного ТГ было выполнено для разных вариантов его компоновки теплоотводящими трубками, но при неизменных значениях наружных габаритов, материале трубок и количестве ходов газа (по «горячей» стороне). Такие условия необходимы для обеспечения возможности присоединения теплообменника к ТГ без внесения конструктивных изменений.

В современных ТГ используют составные конструкции охладителей с разным числом секций. Для ТГ с наиболее распространенной полной водородной системой охлаждения используют двухсекционных конструкции охладителей с последовательным соединением. Такие турбогенераторы (ТГВ—200, ТГВ—200М, ТГВ—235, ТГВ—250) установлены на ТЭС Украины, Беларуси, Российской Федерации, Алжира, Индии, Ирана, Египта, Сирии, Польши, Казахстана, Китая, Индонезии и на ТЭС многих других стран Европы и Азии. Для «воздушных» турбогенераторов (ТА—120 и ТА—35) используют четырехсекционные охладители, у которых также все секции соединены последовательно. Шестисекционные охладители, у которых ни одна секция не имеет последовательного соединения, применяются в турбогенераторах мощностью от 300 до 550 МВт серии ТГВ с водородно-водяным охлаждением. Схемы компоновки многосекционных охладителей представлены на рис. 1—3.

Теплообменники устанавливаются горизонтально или вертикально, имеют разное число ходов охлаждающего газа, что определяет их внутреннюю компоновку трубками, по которым проходит охлаждающая среда (воздух, водород, вода). Для турбогенераторов с водородной и водородно-водяной системами охлаждения (ТГВ—200 ТГВ—250 ТГВ—320, ТГВ—300, ТГВ—325, ТГВ—330 и ТГВ—550) применяются одно- и двухходовые охладители, (рис. 4); для ТГ с воздушной системой охлаждения (ТА—35 и ТА—120) - одноходовые газоохладители (рис. 5).

В ранее проведенных исследованиях [5, 6] нами получена математическая модель, позволяющая изменять величину площади теплосъема в зависимости от вида хладагента при обеспечении требования сохранения габаритов охладителя:

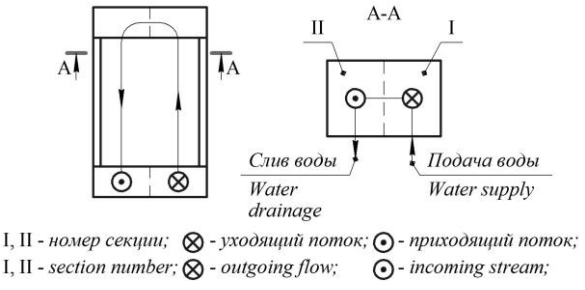


Рис. 1. Двухсекционный газоохладитель.[1]

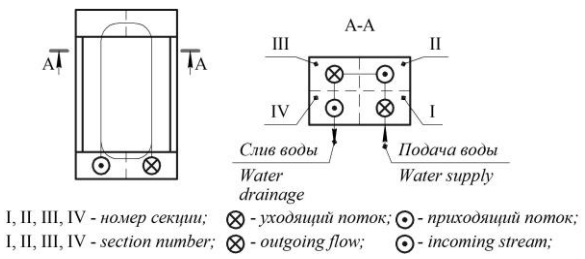


Рис. 2. Четырехсекционный газоохладитель.[2]

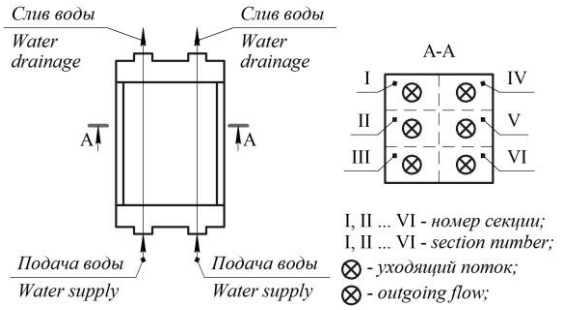


Рис. 3. Шестисекционный газоохладитель.[3]

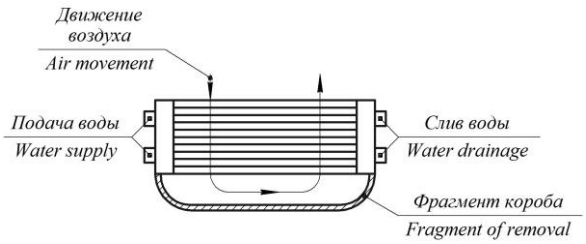


Рис. 4. Газоохладитель с двухходовым движением газа.[4]

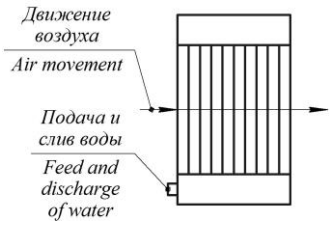


Рис. 5. Газоохладитель с одноходовым движением газа.[5]

[1-7]Appendix 1

$$D = \frac{\left[0{,}41 \cdot \left(\frac{V_B \cdot l_T}{\nu_B}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{\nu_B}{a_B}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{a_B}{a_T}\right)^{0,25}\right] \cdot \lambda_B}{\alpha} \cdot C$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{(a \cdot b) - (1-k) \cdot (a \cdot b)}{n \cdot \pi}};$$

$$\frac{0{,}5 \cdot k^{0,75} + k^2}{(k-1)} = \frac{\left(Z_{ABC} - 0{,}0134 \cdot \delta \cdot \frac{\rho_B}{2 \cdot (a \cdot b)^2}\right) \cdot (a \cdot b)^2}{0{,}5 \cdot \rho_B}$$

где, D — гидравлический диаметр трубки охлаждения, с учетом выбранного типа оребрения, м; V_B — скорость газа на входе в охладитель, м/с; l_T — эффективная длина трубки охлаждения, м; ν_B — коэффициент кинематической вязкости газа, м^2/с; α_B и α_T — коэффициенты теплопроводности газа и материала стенки трубки охлаждения, соответственно, м^2/с; C, k — коэффициенты подобия; ρ_B — плотность газа, кг/м^3; a и b — ширина и глубина охладителя, м; n — количество трубок охлаждения в охладителе, шт; δ — угол поворота канала газа внутри охладителя, рад; Z_{ABC} — аэродинамическое сопротивление участка A—B—C, кг/м^2;

Схематическая модель и схема аэродинамического сопротивления, по которым строилась математическая модель теплообменника, представлены на рис. 6 и рис. 7, соответственно, [6].

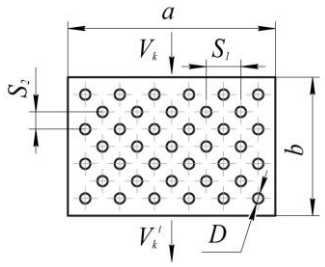


Рис. 6. Схематическая модель теплообменника.[6]

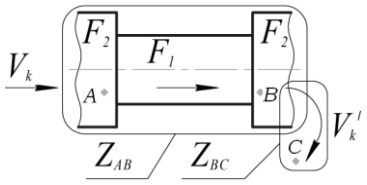


Рис. 7. Схема для расчета аэродинамического сопротивления.[7]

На рис. 6 и рис. 7 приняты обозначения: S_1 — расстояние между трубками в ряду, м; S_2 — расстояние между рядами трубок, м; F_1 — эффективное сечение теплообменника, м^2; F_1 — сечение теплообменника на входе и выходе, м^2; V_B' — скорость воздуха на выходе из охладителя, м/с; Z_{AB}, Z_{BC} — аэродинамические сопротивления участков A—B и B—C, кг/м^2.

Результаты исследований. В расчетах для учета нагруженности ТГ был введен условный режимный параметр работы R, значение которого определяется видом

трубок в теплообменнике, рабочей температурой и расходом теплоносителя, а также давлением на входе в охладитель, (с «горячей» стороны). Принято, что в случае, когда все составляющие, входящие в определение условного режимного параметра *R,* являются номинальными, он равен единице ($R = 1$). При изменении любого фактора режимный параметр снижается пропорционально их изменению. В табл. 1 приведены значения *R* и режимные параметры R_1 (вход, «горячая» сторона) и R_2 (выход, холодная сторона) в зависимости от числа ходов газа внутри теплообменника.

Таблица 1[8]

Значения условного режимного параметра *R* теплоносителей при различной компоновке газоохладителей

Количество ходов газа	Режимный параметр		Условный режимный параметр, *R*
	с горячей стороны, (газ), R_1	с холодной стороны (вода), R_2	
1	2500	2500	1,0
2	2500	5000	0,5
3	2500	7500	0,33
4	2500	10000	0,25

Безразмерные режимные параметры R_1 и R_2 учитывают вид течения охлаждающей среды (турбулентное или ламинарное) и ее теплофизических показателей (число Рейнольдса, кинематическая вязкость, плотность, теплопроводность и т.д.).

В проведенных расчетах использование *R,* R_1 и R_2 позволило определять длину и диаметр трубок охлаждения, подбирать наиболее оптимальный температурный и аэродинамический режим работы, учитывать разные теплофизические характеристик охлаждающей среды, значений температуры и суммарной теплоотводящей площади поверхности трубок теплообменника, число ходов охлаждающего газа в газоохладителе [2, 5]. Критерием выбора оптимальной компоновки было принято минимальное значение режимного параметра *R.* Подробные результаты расчетов приведены в [5]. При проведении расчетов изменения температуры охлаждающего газа на входе в теплообменник («горячая» сторона) в интервале 0—500 °С с шагом 50 °С.

По результатам расчетов построены графики (диаграммы) зависимости эквивалентных тепловых напряжений в теплообменных узлах ТГ в зависимости от относительной площади теплообменной поверхности трубок газоохладителя *l* на указанном интервале температур, рис. 8. Под эквивалентным тепловым напряжением следует понимать максимально допустимое механическое напряжение (определяется пределом текучести материала), которое создается в материале теплообменника на каждом шаге значения температуры. Построение не конкретных графиков, а указание границ возможных изменений, вызвано тем, что в газодинамике используют коэффициенты теплообмена в некотором диапазоне их изменений (число Рейнольдса, кинематическая вязкость, плотность, теплопроводность и т.д.).

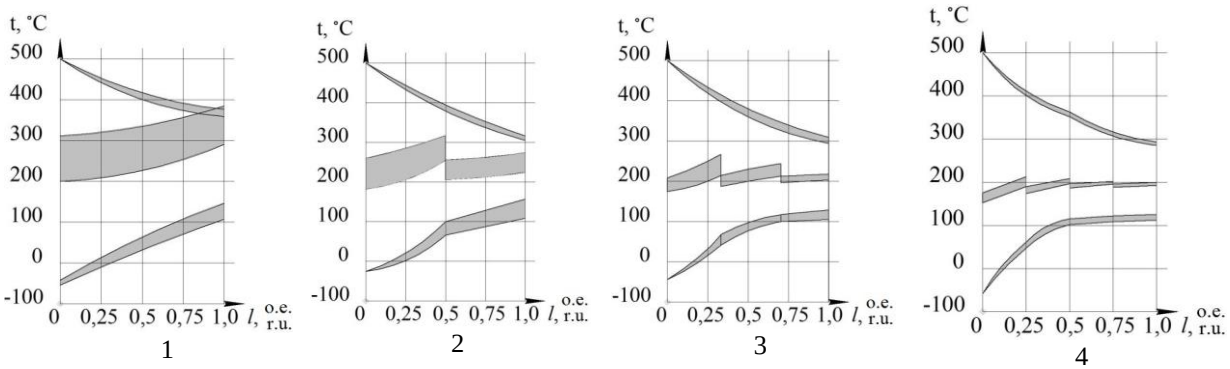
Кроме условного режимного параметра *R* в расчетах был использован геометрический параметр охладителя (R_{geom}), который позволял учитывать геометрию и материал теплоотводящих трубок, и вид их оребрения. Параметр R_{geom} является функцией от теплопроводности трубки и оребрения, длины оребрения на трубке, соотношению толщины стенки трубки к ее внутреннему диаметру и т.д. Для каждого конкретного теплообменника (или серии) параметр R_{geom} определяется индивидуально.

Для элементов охладителя используют разные материалы, с разными коэффициентами линейного расширения, что не позволяет теплоотводящим трубкам свободно расширяться внутри корпуса. В разных режимах в трубках возникают напряжения сжатия, которые изменяются в зависимости от разных режимов. Механические и тепловые напряжения в трубках теплообменника приводят к изменению их прочности и упругости, меняют теплопроводность материалов, из которых они сделаны, что необходимо учитывать при проведении расчетов [6]. В расчетах увеличение геометрического фактора R_{geom} свидетельствовало о повышении эффективности теплоотводящих элементов.

При определении необходимой поверхности трубок теплообменника предельной границей нагрева были выбраны максимальные для данного теплообменника

[8] Appendix 1

эксплуатационные термические напряжения δ_{ecs}, (МПа).



1 – *одноходовой*; 2 – *двухходовой;* 3 – *трёхходовой*; 4 – *четырехходовой теплообменник*.

Рис. 8. Влияние компоновки теплообменного узла турбогенератора на распределение температур по теплообменной поверхности трубок его газоохладителя.[9]

В результате расчетов установили, что при увеличении числа ходов теплоносителя (с холодной стороны) от одного до четырех эквивалентные термические напряжения уменьшаются от 475 до 275 МПа. Результаты расчетов представлены на рис. 9.

Там же показано, что при увеличении числа ходов внутри теплоносителя перепад температуры на теплообменной поверхности аппарата уменьшается более чем в два раза (от 150 до 60 °С), значение максимальной температуры на поверхности теплообменной трубки уменьшается примерно от 350 до 230 °С.

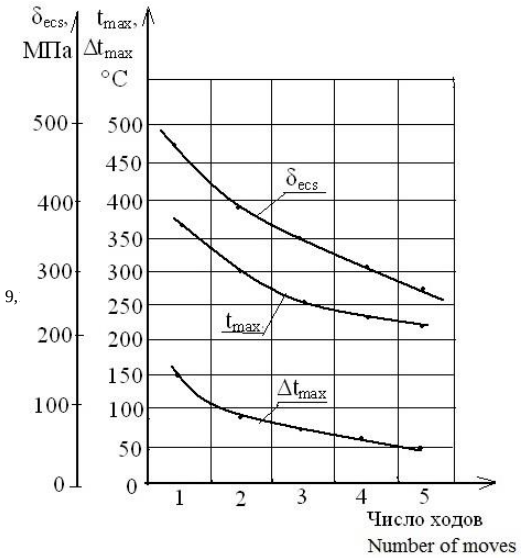


Рис. 9. Влияние числа ходов охлаждающего газа в теплообменнике ТГ на эксплуатационные термические напряжения (δ_{ecs}), на распределение максимальной температуры ($t_{\max}$) и ее перепад на теплообменных поверхностях трубок ($\Delta t_{\max}$).[10]

Для учета одновременного влияния температурных и механических факторов при определении необходимой площади поверхности (и компоновки) трубок охладителей в расчетах был использован обобщенный фактор $R_R = R \cdot R_{geom}$, который фактически является характеристикой эксплуатационной надежности теплообменника.

Поэтому при выборе решения по его компоновке принимали тот вариант, у которого R_R. был минимальный.

Связь между факторами, влияющими на R_R, можно описать системой уравнений:

$$R_R = \begin{cases} k = \dfrac{\beta}{\alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1} + \dfrac{\tau_s}{\lambda_s}}, \\ F_{np} = \dfrac{Q}{k \cdot \Delta t}, \\ \chi = \dfrac{F_s + f_s}{2 \cdot m \cdot f_s}. \end{cases} \quad (1)$$

где принято: k — коэффициент теплопередачи с поверхности трубки, Вт/м$^2 \cdot ^\circ$С; β — коэффициент, учитывающий ухудшение теплопередачи с поверхности трубки из-за термического сопротивления отложений, образовавшихся в процессе работы; α_1 — коэффициент теплоотдачи от нагретого газа к стенке трубки, Вт/м$^2 \cdot ^\circ$С; α_2 — коэффициент теплоотдачи от нагретого стенки трубки к воде, Вт/м$^2 \cdot ^\circ$С; τ_s — толщина стенки трубки, мм; λ_s —

коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт/м}\cdot{}^{\circ}\text{C}$; F_s — площадь теплообменной поверхности, м^2; Q — производительность теплообменного аппарата, кг/с; Δt — среднее логарифмическое значение температуры охлаждающей среды при противотоке, °С; χ — число ходов с «холодной» стороны; f_s — теплообменная поверхность одной трубки, м^2; m — количество трубок, по которым протекает вода.

Установлено, что увеличение количества ходов с холодной стороны соответствует снижению фактора R_R и что внутренняя компоновка теплообменника существенно влияет на перепад температуры на теплообменной поверхности трубок охладителя: при увеличении количества ходов этот перепад уменьшается, а температура в теплообменнике и на теплообменных поверхностях распределяется более равномерно.

Также была установлена зависимость R_R и эквивалентных термических напряжений δ_{ecs} от компоновки теплообменного узла ТГ. В расчетах был заложен запас 5,3 % по обеспечению отвода тепла при выборе компоновки теплообменника, что удовлетворяет требованиям ГОСТ EN 305-2001 (не менее 5 %).

Отдельно был рассмотрен вопрос использования теплообменника с переменным оребрением по длине с холодной и с горячей стороны, что применяется для повышения эксплуатационной надежности.

Такое изменение (фактически, изменение геометрического фактора R_{geom}) при одноходовой конструкции охладителя и фиксированном значении режимного фактора R позволяет задавать любой закон распределения термических сопротивлений и получить практически любой вариант распределения температуры по теплообменной поверхности в конкретных эксплуатационных условиях. В работе [5] представлены алгоритм и результаты расчетов охладителей, трубки которых имеют проволочное оребрение [5]. На рис. 10 представлен фрагмент трубки газоохладителя с проволочной навивкой.

Для применения результатов исследований на практике необходимо определить связь производительности теплообменника, величина которой выбирается в зависимости от величины отводимых потерь мощности в ТГ P, кВт:

$$P = P_m \cdot (1-\eta) - \Delta P_m \qquad (2)$$

где P_{em} — электрическая мощность ТГ, кВт; η — коэффициент полезного действия ТГ, о.е., ΔP_m — механические потери мощности в подшипниках, которые вынесены за объем ТГ и охлаждаются от другой системы, кВт.

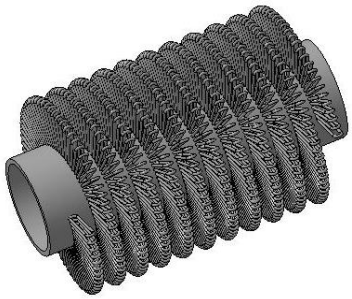


Рис. 10. Фрагмент трубки газоохладителя с проволочной навивкой.[11]

Расход охлаждающей среды (в $\text{м}^3/\text{с}$), необходимый для отвода тепла из ТГ, равен:

$$V = \frac{P}{c \cdot \Theta_B} \qquad (3)$$

где c — удельная объемная теплоемкость охлаждающей среды, $\text{Дж/(град}\cdot\text{м}^3)$; $\Theta_B = t_r - t_c$ — превышение температуры выходящей из генератора нагретой охлаждающей среды t_r над температурой охлаждающей среды t_c, поступающей в генератор, °С. Результаты экспериментального исследования теплообменника при разных геометрических размерах, расположении и количестве трубок, при разных типах, величине и материале оребрения, подробно изложены в [27].

Пример. При воздушном охлаждении $c = 1100\ \text{Дж/(град}\cdot\text{м}^3)$. Величина Θ_B в зависимости от системы вентиляции, конструкции ТГ и его мощности изменяется в пределах 12—30° С. Тогда на 1 кВт потерь в воздушном ТГ расход воздуха:

$$V = \frac{1000}{1100 \cdot (12...30)} = 0.03...0.075\ \text{м}^3/\text{с},$$

$$\text{или } 110...270\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

[11] Appendix 1

Для водорода при атмосферном давлении $c = 14270$ Дж/(град·м^3), и поэтому его объемный расход уменьшается и будет в 14.4 раза меньше расхода воздуха.

В процессе эксплуатации возможно снижение расхода охлаждающего газа, например, из-за засорения фильтров. Так для ТГ с воздушным охлаждением недостаточный расход воздуха в охладителе при номинальной нагрузке вызывает увеличение его температуры на выходе из охладителя для любой геометрии, °С:

$$\Delta t_{air} = \frac{P}{1.1 \cdot Q_{air}} \quad (4)$$

где P — суммарные потери в ТГ, отводимые охлаждающим воздухом, кВт; 1,1 — коэффициент, значение которого является произведением удельного веса воздуха на его теплоемкость при 35 °С; Q_{air} — объем воздуха, циркулирующего через генератор, м^3/с.

При охлаждении обмотки статора водой были зафиксированы случаи засорения трубок илом, грязью, инородными предметами, что, как и при засорении фильтров «газовых» ТГ, приводило к снижению расхода воды и, соответственно, к увеличению превышения температуры Δt_{water}:

$$\Delta t_{water} = 0{,}86 \cdot \frac{P}{Q_{water}} \quad (5)$$

где Q_{water} — количество воды, проходящее через теплообменник, м^3/ч. 0,86 – тепловой коэффициент.

При сервисном обслуживании ТГ, экспериментально определено, что среднее превышение температуры охлаждающей воды (Δt_{water}) в засоренных охладителях ТГ над расчетной температурой составляло 2—3 °С. Это превышение необходимо учитывать при оценке теплового состояния ТГ при анализе полученных расчетных данных.

Выводы

1. Допустимость повышения мощности ТГ в единичном исполнении определяется возможностями его систем охлаждения, обеспечивающими необходимый отвод тепла во внутреннем объеме ТГ. В зависимости от этого должны рассчитываться параметры теплообменников.

2. Для оценки эффективности теплообменников с учетом их габаритов, вида охлаждающей среды, числа секций и ходов, режима движения охлаждающей среды, материала и вида оребрения трубок были введены режимные коэффициенты, каждый из которых объединяет группу факторов, влияющих на эффективность теплообменника: условный режимный параметр работы R учитывает количество трубок в теплообменнике, рабочую температуру и расход теплоносителя, давление на входе в охладитель, величину электромагнитных нагрузок, определяющих перепад температуры и равномерность ее распределения по поверхности трубок; режимные параметры учитывают число ходов газа внутри теплообменника со стороны входа (R_1) и со стороны выхода из теплообменника (R_2); геометрический параметр охладителя (R_{geom}) позволяет учитывать геометрию, материал теплоотводящих трубок и вид их оребрения.

3. Установлены диапазоны изменения эквивалентных тепловых напряжений (δ_{ecs}) в теплообменниках ТГ в зависимости от площади теплообменной поверхности трубок в рабочем интервале температур. Наибольшее влияние на эквивалентное тепловое напряжение оказывает вид, рабочая температура и расход теплоносителя, а также давление на входе в охладитель с «горячей» стороны. Эти данные необходимо учитывать для предупреждения механических разрушений узлов теплообменника.

4. Установлено, что при увеличении количества ходов охлаждающей среды (с «холодной» стороны) режимный фактор R снижается, т.е. повышается эффективность отвода тепла в ТГ, не зависимо от используемой системы охлаждения.

5. Можно утверждать, что расположение трубок теплообменника внутри корпуса (т.е. R_{geom}) не оказывает существенного влияния на их способность отводить тепло, и может быть выбрано в соответствии с конструкцией узла связи ТГ и теплообменника. Основное влияние на максимальную температуру теплообменных поверхностей и на величину возникающих напряжений оказывает вид, форма, высота и материал оребрения трубок.

6. Т.к. R_{geom} не оказывает существенного влияния на теплоотвод, то основным фактором, влияющим на эффективность теплообменника, можно считать изменения условного режимного параметра работы *R*, который в основном зависит от режима эксплуатации и электромагнитных нагрузок.

7. Полученные результаты исследований позволяют предложить в качестве критерия выбора оптимальной конструкции и компоновки теплообменника ТГ минимальное значение режимного коэффициента *R*, который учитывает вид охлаждающей среды (воздух, водород, вода), диапазон изменения нагрузки и рабочей температуры, а также количество, материал, расположение и способ оребрения трубок.

APPENDIX (ПРИЛОЖЕНИЕ)

Fig. 1. Two-section gas cooler
Fig. 2. Four-section gas cooler
Fig. 3. Six-section gas cooler
Fig. 4. Gas cooler with two-way gas movement
Fig. 5. Gas flow cooler
Fig. 6. Schematic model of the heat exchanger
Fig. 7. Scheme for calculating the aerodynamic resistance of the heat exchanger
Fig. 8. The influence of the layout of the heat exchange unit of a large electric machine on the temperature distribution over the heat exchange surface of the tube (plate): 1 — one-way; 2 — two-way; 3 — three-way; 4 — four-way heat exchanger.
Fig. 9. Influence of the number of coolant gas passages in the TG heat exchanger on the distribution ($t_{\max}$) and difference ($\Delta t_{\max}$) of the maximum temperature on the heat-exchange surfaces of the tubes and on the operating thermal stresses.
Fig. 10. Fragment of gas cooler tube with wire winding.
Table 1. Conventional gas coolers with different layouts of gas coolers. Number of gas strokes. Mode parameter: from the hot side, (gas) R_1; from the cold side (water) R_2. Conditional parameter R.

Литература (References)

[1] Kumenko A.I., Kostyukov V.N., Kuz'minykh N.Yu., et al. Development of elements of the condition monitoring system of turbogenerators of thermal power stations and nuclear power plants. *Thermal Engineering*. 2017, volume 64, issue 8, pp. 559—567.

[2] Sedlazeck K., Richter C., Strack S., et al. Type testing a 2000 MW turbogenerator. *Electric Machines and Drives Conference*, 2009. Miami, Fl, USA, pp. 465—470. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075247.

[3] Vasyaev A.V., Golovko V.F., Dmitrieva I.V., et al. Substantiation of the parameters and layout solutions for an energy conversion unit with a gas-turbine cycle in a nuclear power plant with HTGR. *Atomic Energy*, 2005, no. 98(1), pp. 21—31. doi: 10.1007/s10512—005—0164—z

[4] Khripach N. A., Lezhnev L.Y., Tatarnikov A.P., et al. Turbogenerators in energy recovery systems. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 9, issue 6, June 2018, pp. 1009—1018.

[5] Shevchenko V.V., Minko A.N., Razvitie sistem ohlazhdeniya i optimizatsiya konstruktsiy turbogeneratorov: monografiya. [Development of cooling systems and optimization of turbogenerator designs: monograph]. Kharkov: Izd. Ivanchenko I.S., 2013, 242 p. (In Russian).

[6] Shevchenko Valentina V. Proposals for improving the technical state of turbogenerators in excess of the service life. *Modern Electrical and Energy Systems* (*MEES—2017 IEEE*). 2017, p.p. 156—159. doi: 10.1109/MEES.2017.8248876.

[7] Sedlazeck K., Adelmann W., et al. Influence of Customers' Specifications upon Design Features of the EPR Turbogenerator. *CIGRE Report 11-106, 2002 Session. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption. — MAN Diesel & Turbo (MAN Group*), 32 p.

[8] Anikina I.D., Sergeyev V.V., Amosov N.T., et al. Use of heat pumps in turbogenerator hydrogen cooling systems at thermal power plant // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2017, volume 42, Issue 1, pp. 636—642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.256

[9] Pham H.S. Mapping of the thermodynamic performance of the supercritical CO_2 cycle and optimisation for a small modular reactor and a sodium-cooled fast reactor. *Energy*, 2015, no. 87, pp. 412—424.

[10] Anikina I.D., Sergeyev V.V., Amosov N.T., et al. Use of heat pumps in turbogenerator hydrogen cooling systems at thermal power plant. *International Journal of Hydrogen Energy*. 5 January 2017, volume 42, issue 1, pp. 636—642. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.256

[11] Toshio Kitajima, Hiromichi Ito, Susumu Nagano, Yukihiko Kazao. The World's Largest Capacity Turbine Generators with Indirect Hydrogen-Cooling Toshiba Corporation (Japan). *Paris: Session 2004, A1—106*, pp.1—8.

[12] Milman O.O., Shifrin B.A., Perov V.B, et al. The working medium for the megawatt class utilization heat and power complex based on Organic Rankine Cycle. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf.* 2018, series 1105, pp. 1—11.

[13] Carl-Ernst S., Jürgen Baer, Hans Zimmermann, et al. New air-cooled turbogenerator in the 300-MVA class. *ABB Power Generation ABB Review*, 1/1996, pp. 20—28.
[14] Ledukhovsky G.V., Barochkin Yu.E., Zhukov V.P., et al. Water Deaeration in Water-Cooling Systems of the Stator Winding in a Turbogenerator with Hydrogen-Water Cooling. *Thermal Engineering*. 2018, vol. 65, Issue 10, pp. 751—755.
[15] Kenichi Hattori, Kazumasa Ide, Fumihiko Goto, et al. Sophisticated Design of Turbine Generator with Inner Cooler Ventilation System. *Hitachi Review*. 2002, vol. 51, no. 5, pp. 148—152.
[16] Miction M. Switched Reluctance Turbogenerator for Exhaust Gas Energy Recovery. // *Proc. IEEE Power Electron. Motion Control Conf. Portoroz*, Slovenia, 2006, pp. 1801—1807.
[17] Nozhnitsky Y.A., Kuevda V.K. Prevention of a dangerous failure of a gas turbine engine due to fracture, disconnection or displacement of the shafts. *An Engineering Journal, Proc. of the Scientific and Technical Congress of Engine-building.* Moscow, 2018, pp.267—276.
[18] Nozhnitsky Y.A., Servetnik A.N. Prevention of Hazardous Failure of the Turbine Rotor Due to Its Overspeed. *IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 449, Conf. 1, pp. 1—10. DOI:10.1088/1757—899X/449/1/012025
[19] Servetnik A.N. Load-carrying capability simulation of aviation gas turbine engine disc Handbook /*An Engineering Journal*, 2012, Vol. 187, № 10, pp.44—49.
[20] Tartaglione Vincenzo. Tests on a 500 MVA Hydrogen Cooled Turbogenerator in Single Shaft Configuration. *Ansaldo Energia (Italy) CIGRE–2006*. — Paper A1 — 103.
[21] Joho R., Baumgartner J., Stephan C. Type-tested Air-cooled Turbogenerator in the 500 MVA Range. *CIGRE Session. — 2000*, pp. 11—101.
[22] Miction M. Modeling and Testing of a Turbogenerator System for Exhaust Gas Energy Recovery. // *Proc. Vehicle Power Electron and Propulsion Conf.*, Arlington. USA, 2007, pp. 544—550.
[23] Zuomin Wang, Jiade Han. Numerical simulation of air flow distribution in large air-cooled turbogenerator rotor at different rotation speed and inlet pressure. *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2014, pp. 2352 — 2355. doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013898.
[24] Kitajima, T., Ito H., Nagano S., et al. The World's Largest Capacity Turbine Generators with Indirect Hydrogen-Cooling. *CIGRE 40th Meeting in Paris*, 2004.
[25] Lindh Pia M., Petrov I., Scott Semken R., et al. Direct Liquid Cooling in Low-Power Electrical Machines. *Proof-of-Concept Energy Conversion IEEE*. 2016, vol. 31, no. 4, pp. 1257—1266. doi: 10.1109/TEC.2016.2597059.
[26] Gray R., Montgomery L., Nelson J., et al, Designing the cooling systems for the world's most powerful turbogenerator. *EEE Power Engineering Society General Meeting, Olkiluoto unit 3*. 18—22 June 2006, Montreal, Que., Canada. doi: 10.1109/PES.2006.1708951
[27] Minko A.N., Shevchenko V.V., Gordienko V.U. Rezul'taty ispytaniy teploobmennogo ustroystva s uluchshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami dlya turbogeneratorov s vozdushnoy sistemoy okhlazhdeniya [Test results of heat exchangers with improved performance characteristics for turbine generators with an air cooling system] / *Visnyk NTU«KHPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya*. – Kharkov, 2013, №14(988), pp. 102—107. (In Russian). doi: 10.5281/zenodo.2545473.

Сведения об авторах.

Минко Александр Николаевич, кандидат технических наук, начальник проектно-конструкторского отдела, ЧНПФ «Анкор-Теплоэнерго», e-mail: alexandr.minko@i.ua

Шевченко Валентина Владимировна, канд. технических наук, доцент, профессор кафедры электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», e-mail: zurbagan8454@gmail.com.

Control of Heat Exchanger with Variable Heat Transfer Surface Area

Sit M.L., Patsiuk V.I., Juravliov A.A., Burciu V.I., Timchenko D.V.
Institute of Power Engineering, Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The work deals with the development of a control system for heat exchangers with variable surface area of heat transfer, used, in particular, for heat pumps intended primarily for heat supply systems using the high-quality law of regulation of the heat supply mode (with a constant flow rate of the heat carrier). The aim of the work is to develop a scheme for the control of a heat exchanger with a variable surface area of heat exchange in which main disturbances will be compensated: i.e. the temperature of the heat carrier, heat carrier's flowrates, and changes in the thermophysical parameters of the heat carriers. This goal has been achieved using a custom PID controller in the contour of control of the drive of the moving heat-insulating insert. To solve this problem, we obtained the equations of the statics of the heat exchanger with regard to the adjustable insert, the dynamic model of the heat exchanger taking into account this insert. The novelty of the work is control laws of an adjustable heat-conducting insert between the primary and secondary coolants of the heat exchanger, which allow compensating the main disturbances, which influence the heat exchanger. A method has been developed for solving differential-integral equations of heat exchanger statics with an insert (HEI), which allowed analytically expressing the ratio of average integral heat carrier temperatures in a heat exchanger depending on the heat exchanger length, which allows building a control system for a heat exchanger with a variable heat exchange surface area.

***Keywords*:** heat exchanger, variable heat transfer surface, control system, mathematic model, heat pump.
DOI: 10.5281/zenodo.2650427

Dirijarea schimbătorului de căldură cu suparafața variabilă de schimb de căldură

Șit M.L., Pațiuc V.I., Juravliov A.A., Burciu V.I., Timcenco D.V.
Institutul de Energetică, Republica Moldova, Chișinău

Rezumat. Lucrarea este consacrată elaborării unui sistem de dirijare cu schimbătoarele de căldură cu suprafață variabilă a zonei de transfer de căldură, destinate, în particular, pentru pompe de căldură, utilizate, în primul rând, pentru sistemele de alimentare cu căldură, care utilizează legea calitativă de reglare a regimului de alimentare cu energie termică (cu un debit constant a agentului termic). Scopul lucrării este elaborarea schemei unui sistem de dirijare cu schimbătorul de căldură cu suprafață variabilă a zonei de transfer de căldură, în care se realizează compensarea perturbațiilor: după temperatura agentului termic, după debitul agenţelor termici, după modificările parametrilor termofizici ale agenţilor termici. Acest scop este realizat datorită utilizării unui controler PID reglabil în conturul unui insertor reglabil al schimbătorului de căldură. Manșonul intermediar se deplasează datorită utilizârii, spre exemplu, a unui mecanism pas cu pas electric. Pentru realizarea problemei, au fost obținute ecuațiile statice ale schimbătorului de căldură cu luarea în consideraţie a insertorului reglabil, modelul dinamic al schimbătorului de căldură cu luarea în consideraţie a insertorului termoizolant. Noutatea lucrării constă în propunerea de a utiliza insertorul conductiv de căldură reglabil între agenții termici primar și secundar ale schimbătorului de căldură, care poate compensa perturbația de la modificarea debitului agenţilor termici, fluctuațiile temperaturii la intrările agenţilor termici în regim static și dinamic, precum și modificările ratei de curgere a agenţilor termici cu utilizarea legilor simple de dirijare, modelul dinamic al schimbătorului de căldură cu insertorul conductiv de căldură, sistemul de dirijare cu schimbătoarele de căldură cu suprafață variabilă de schimb de căldură.

***Cuvinte-cheie*:** schimbătorul de căldură, suprafața variabilă de schimb de căldură, sistemul de diriajre, modelul matematic, diriajre.

Управление теплообменным аппаратом с переменной площадью поверхности теплообмена

Шит М.Л., Пацюк В.И., Журавлев А.А., Бурчу В.И., Тимченко Д.В.
Институт энергетики, Республика Молдова, Кишинев

© Шит М.Л., Пацюк В.И., Журавлев А.А., Бурчиу В.И., Тимченко Д.В. 2019

Аннотация. Работа посвящена разработке системы управления теплообменниками с переменной площадью поверхности теплообмена, предназначенных, в частности, для тепловых насосов предназначенных, в основном, для систем теплоснабжения использующих качественный закон регулирования режима подачи теплоты (с постоянным расходом теплоносителя)**.** Целью работы является разработка схемы системы управления теплообменником с переменной площадью поверхности теплообмена, в которой производится компенсация возмущений: по температуре греющего теплоносителя, по расходам теплоносителей, по изменениям теплофизических параметров теплоносителей. Поставленная цель достигается за счет использования настраиваемого ПИД регулятора в цепи привода регулируемой вставки теплообменника. Промежуточная гильза перемещается за счет использования, например, электрического шагового привода. Для решения поставленной задачи были получены уравнения статики теплообменного аппарата с учетом регулируемой вставки, динамическая модель теплообменника с учетом теплоизолирующей вставки. Новизной работы является предложение использовать регулируемую теплопроводящую вставку между первичным и вторичным теплоносителями теплообменного аппарата, что позволяет компенсировать возмущения от изменения расходов теплоносителей, колебаний температур на входах теплоносителей в статике и в динамике, а также изменений расходов теплоносителей с использованием простых законов управления, динамическая модель теплообменника с теплопроводящей вставкой, система управления теплообменников с изменяемой поверхностью теплообмена. Разработана методика решения дифференциально-интегральных уравнений статики теплообменника со вставкой (ТОВ), позволившая аналитически выразить отношение среднеинтегральных значений температур теплоносителей в теплообменнике в зависимости от длины теплообменника, что позволяет построить систему управления теплообменником с переменной площадью поверхности теплообмена. Рассмотрены для системы управления: с ПИД-регулятором, и ПИД-регулятором и последовательно включенным с ним корректирующим звеном. Данные структурные схемы являются базой для построения современных структур систему управления ТОВ, например, с прогнозирующей моделью.
***Ключевые слова*:** теплообменник, переменная площадь поверхности теплообмена, система управления, математическая модель, тепловой насос.

Условные обозначения.

Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование
S_w	Площадь поперечного сечения стенки для теплопередающей стенки, м^2.	L	Длина теплообменника
u	Величина смещения теплопроводящего узла.		ИНДЕКСЫ
T	Температура,	in	Вход потока
$G1$	Расход греющего теплового агента, кг/с.	out	Выход потока
$G2$	Расход нагреваемой среды, кг/с.	λ	Теплопроводность материала трубы, Вт.(м*К)
$H1$	Удельная энтальпия греющей среды, кДж/кг.	wh	Стенка трубопровода горячего теплоносителя
$H2$	Удельная энтальпия нагреваемой среды, кДж/кг.	wl	Стенка трубопровода холодного теплоносителя
K	Линейный коэффициент теплопередачи, Вт/м К	wst	Стенка вставки
F	Площадь поверхности теплообмена, м^2	h	Горячий поток
Δt_m	Среднелогарифмическая разность температур, ^oC	l	Холодный поток
V	Объем 1 м стенки, м^3	w	Стенка
d_l	Внутренний диаметр канала нагреваемой среды, м.	wst	Перемещающаяся стенка
d_h	Внутренний диаметр канала греющей среды, м.		

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменники с переменной площадью поверхности теплообмена могут найти

© Шит М.Л., Пацюк В.И., Журавлев А.А., Бурчиу В.И., Тимченко Д.В. 2019

применение в теплонасосных системах теплоснабжения с качественным законом регулирования тепловой нагрузки, при проектировании внутренних рекуперативных теплообменников тепловых насосов. Их применение позволяет компенсировать влияние изменения расхода рабочих сред на температуру нагреваемой среды на выходе теплообменника посредством изменения площади поверхности теплообмена. Системы управления теплообменными аппаратами (ТО), в которых управление режимами их работы осуществляется изменением температуры и расхода греющего теплоносителя, расхода нагреваемой среды, или с использованием байпасирования теплообменного аппарата много раз описаны в литературе, например, [1-4]. Системы управления теплообменными аппаратами, в которых переменная площадь поверхности теплообмена обеспечивается за счет изменения площади погружения поверхности теплообменника в жидкость, описаны в [7-9]. ТО, в котором площадь теплообмена изменяется за счет перемещения вставки между «горячим» и «холодным» теплоносителями в открытой научной литературе не описаны. Известны лишь несколько патентов.

В работе авторов, опубликованной в этом журнале в 2018 году, приведен ряд возможных схем управления режимом его работы. Тем не менее, этот вопрос требует дальнейших исследований.
Для управления теплообменниками применяют классические, современные, и пост-современные законы управления.

Уравнения статики теплообменника с перемещающейся стенкой будут иметь тот же вид, что и (1) - (3). Градиент температуры внутри системы стенок будет близок к нулю.

Уравнение динамики теплорегулирующего узла (уравнения тепловых балансов в дифференциальной форме теплообменника) имеет вид:

Обозначим: $\pi \cdot \left(D_3^2 - D_2^2\right) \cdot \rho_l = a_1;\ \pi \cdot D_2 = a_2.$

$$a_1 \cdot u \cdot c_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} - v_l \cdot a_1 \cdot u \cdot c_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial u} + \alpha_l \cdot u \cdot \pi \cdot D_2 \cdot (T_l - T_{wl}) = 0; \quad (1)$$

После деления (1) на u получим:

$$a_1 \cdot c_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} - v_l \cdot a_1 \cdot c_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial u} + \alpha_l \cdot a_2 \cdot (T_l - T_{wl}) = 0; \quad (2)$$

Далее

$$m_{w11} \cdot u \cdot c_{w1} \cdot \frac{\partial T_{wl}}{\partial t} = \alpha_l \cdot u \cdot F_{l\max}\left(T_l - T_{wl}\right) - k_l \cdot F_{l\max} \cdot u \cdot \left(T_l - T_{wst}\right);$$
$$\pi\left(D_2^2 - D_1^2\right) \cdot \rho \cdot u \cdot c_{w1} \cdot \frac{\partial T_{wl}}{\partial t} = \alpha_l \cdot u \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \left(T_l - T_{wl}\right) - k_l \cdot \pi \cdot D_2 \cdot u \cdot \left(T_l - T_{wst}\right) \quad (3)$$

$$m_{h1} \cdot u \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} + v_h \cdot m_{h1} \cdot u \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial u} - \alpha_h \cdot u \cdot F_{h\max} / k_F \cdot (T_{wh} - T_h) = 0;$$
$$\pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot u \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} + \pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot u \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial u} - \alpha_h \cdot u \cdot \pi \cdot D_{hin} / k_F \cdot (T_{wh} - T_h) = 0 \quad (4)$$
$$\pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} + \pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot c_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial u} - \alpha_h \cdot \pi \cdot D_{hin} / k_F \cdot (T_{wh} - T_h) = 0$$

$$\pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot u \cdot c_{wh} \cdot \frac{\partial T_{wh}}{\partial t} = -\alpha_h \cdot u \cdot F_{l\max} / k_F \cdot \left(T_{wh} - T_h\right) - k_h \cdot F_{h\max} \cdot u \cdot \left(T_{wh} - T_{wst}\right);$$
$$\pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot c_{wh} \cdot \frac{\partial T_{wh}}{\partial t} = -\alpha_h \cdot F_{l\max} / k_F \cdot \left(T_{wh} - T_h\right) - k_h \cdot F_{h\max} \cdot \left(T_{wh} - T_{wst}\right); \quad (5)$$

$$m_{wst1} \cdot c_{wst} \cdot \frac{\partial T_{wst}}{\partial t} = -k_h \cdot F_{h\max} / k_F \cdot \left(T_{wh} - T_{wst}\right) + k_l \cdot F_{l\max} \cdot \left(T_{wl} - T_{wst}\right); \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$k_F = F_l / F_H \ , \ x = F_l / F_{l\max} \ , \qquad (7)$$

$$a_h = \pi D_{hin}^2 \cdot \rho \cdot c_{wh}; \quad a_l = \nu_1 \cdot a_1 \cdot c_l; \qquad (8)$$
$$b_h = \pi \cdot \alpha_h \cdot D_{hin} / k_F; \ b_l = \alpha_l \cdot a_2;$$

$F_{l\max}$ – максимальное значение площади теплообмена между потоками

$$l_{\max} = F_{l\max} / (\pi d_l); \qquad (9)$$

Граничные условия для потоков (условия постоянства температуры на входе в теплообменник, они же начальные условия в нулевой момент времени):

$$\frac{dT_1}{dx}\Big|(x=0)=0; \ \frac{dT_2}{dx}\Big|(x=L)=0; \qquad (10)$$

Граничные условия для теплопередающей стенки и корпуса теплообменника, исходя из отсутствия теплового потока на их осевых краях, записываются как:

$$\frac{dT_w}{dx}\Big|(x=0)=0; \ \frac{dT_w}{dx}\Big|(x=L)=0; \qquad (11)$$

Схема теплообменника с регулируемой площадью поверхности теплообмена и принцип работы

Схема теплообменника (на примере типового теплообменника типа «труба в трубе») имеет вид (рис.1). На верхней части рисунка показан теплообменник в исходном состоянии, на нижней – со сдвинутой разделительной стенкой в сторону, противоположную, направлению движения греющего потока. При таком условии и выводится математическая модель теплообменника.

Математическая модель теплообменника

Термодинамическая модель теплообменника основана на следующих предположениях:

– температура среды внутри теплообменника равна средней температуре нагреваемой среды; теплоизоляция обладает высоким тепловым сопротивлением.

Основными уравнениями, лежащими в основе проектного расчета теплообменного аппарата, являются уравнения теплового баланса.

$$Q = G1 \cdot (H1_{in} - H1_{ex}) = G2 \cdot (H2_{in} - H2_{ex}) \qquad (12)$$

и основное уравнение теплопередачи

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{ml} \qquad (13)$$

$$\Delta t_{ml} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_m}}, \qquad (14)$$

$$\Delta t_b = t_{1out} - t_{2in}; \qquad (15)$$
$$\Delta t_m = t_{1in} - t_{2out};$$

Когда при проектировании теплообменника ставится задача обеспечить постоянное значение величины Δt_m при постоянных температурах входных потоков t_{1in}, t_{2in}, переменной тепловой нагрузке Q и постоянном расходе, то из уравнения (2) следует, что эта цель может быть достигнута только изменением значения параметра F. При постоянной тепловой нагрузке Q, но при пульсациях расходов тепловых агентов, только площадь теплообмена F является основной управляющей величиной, которая может быть использована для стабилизации температуры нагреваемой среды.

– пренебрегают изменениями потенциальными и кинетическими изменениями энергии двух жидкостей;

– пренебрегаем падением давления внутри трубок;

– теплообменник теплоизолирован от окружающей среды;

– жидкости не меняют своего фазового состояния;

– стенки теплообменника сделаны из одинакового материала, например, из углеродистой стали;

– температура каждой из жидкостей одинакова по сечению;

– удельная теплоемкость каждой из жидкостей постоянна при постоянном давлении;

– массовые расходы сред известны;

Рассмотрим решение уравнения статики теплообменника, которое имеет вид:

Рассмотрим вначале упрощенные уравнения статики теплообменника. Предполагаем, что между движущейся вставкой и стенками существует конечное, достаточно малое, значение теплового сопротивления. В формулах (5) - (7) d_1 – внутренний диаметр трубы греюще-

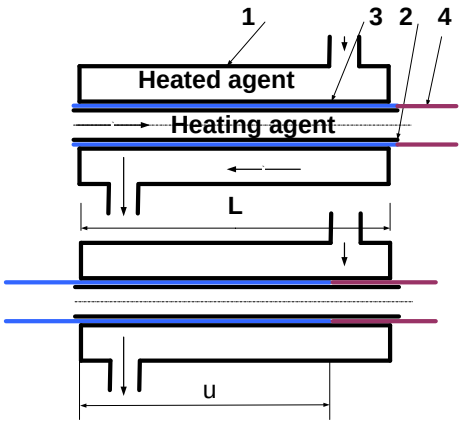
го потока, d_2 – внутренний диаметр трубы нагреваемого потока, α_1 – коэффициент теплоотдачи на внутренней стенке трубы греющего потока, α_2 – коэффициент теплоотдачи на внутренней стенке трубы греющего потока, R_k - контактное тепловое сопротивление между вставкой и стенками труб теплообменника.

$$\frac{dT_h}{dx} = \frac{K}{c_h G_h} \cdot (T_l - T_h) \qquad (16)$$

$$\frac{dT_l}{dx} = \frac{K}{c_l G_l} \cdot (T_l - T_h) \qquad (17)$$

$$\alpha_c F_l (T_w - T_2) + \alpha_h F_h (T_1 - T_w) = 0. \qquad (18)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda} \cdot \ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1}{\alpha_2 d_2} + 2 \cdot R_k}, \qquad (19)$$



1 –Наружная труба (external pipe), 2 – внутренняя труба (internal pipe), 3 – теплопроводящий узел (heat conducting unit), 4 – теплоизолирующая вставка (heat insulation pipe).

Рис.1. Схема теплообменника (Fig2 – heat exchanger scheme).

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОМ

Схемам управления теплообменными аппаратами посвящено большое количество работ [4-20].

Эти работы связанны с построением систем на нечеткой логике, нейросетей, адаптивных систем управления, нелинейных систем управления, LKG- регуляторов.

Управление теплообменными аппаратами может осуществляться:

изменением температуры греющей среды (теплообменники тепловых насосов, теплообменные аппараты, управляемые от котлов, ТЭЦ и т.п.,);

изменением температуры нагреваемой среды;

изменением расходов, как греющей, так и нагреваемой сред;

изменением конструктивных параметров теплообменника, например, изменением площади поверхности теплообмена.

Последний способ не нашел широкого распространения на практике, ввиду ряда ограничений конструктивного характера. Так изменение площади поверхности теплообмена в погружных теплообменниках может осуществляться путем изменения степени погружения змеевика. Система, реализующая подобный алгоритм, достаточно сложная, так как требует дополнительного оборудования для регулирования уровня нагреваемой среды в погружном теплообменнике.

Передаточная функция прямоточного теплообменника имеет вид [1]

$$W(p,L) = \frac{T_2(p,L)}{T_1(p,0)} = b(p) \cdot \left(1 - e^{\frac{-\tau}{a(p)}}\right) \qquad (20)$$

Путем простых вычислений можно показать, что передаточная функция противоточного теплообменника имеет вид.

$$W(p,L) = \frac{T_2(p,L)}{T_1(p,0)} = b(p) \cdot \left(1 - e^{\frac{\tau}{a(p)}}\right) \qquad (21)$$

где

$$a(p) = \frac{T_L (T_{wl} p + 1 + \chi)}{(T_L p + 1)(T_{wl} p + 1 + \chi) - \chi}; \qquad (22)$$

$$b(p) = \frac{1}{T_L T_{wl} p^2 + (T_{wl} + (1+\chi) T_L) p + 1}; \qquad (23)$$

$$T_L = \frac{M_L c_{pL}}{F_1 \alpha_1}; T_{wl} = \frac{M_{wl} c_{wl}}{F_1 \alpha_1 + F_2 \alpha_2}; \chi = \frac{F_1 \alpha_1}{F_2 \alpha_2}.$$

Запишем уравнение (4) в виде:

$$b(p) = \frac{1}{(T_{B1} p + 1) \cdot (T_{B2} p + 1)}; \qquad (24)$$

$$T_2(p,L) = T_1(p) b(p) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{a(p)}}\right),$$

Выполним преобразования:

для прямоточного теплообменника:

$$\frac{1}{a(p)}=\frac{(T_L p+1)(T_{wl} p+1+\chi)-\chi}{T_L\left((T_{wl} p+1+\chi)\right)}$$

$$e^{-\frac{\tau}{a(p)}}=e^{-\frac{\tau}{T_L}\frac{(T_L p+1)(T_{wl} p+1+\chi)-\chi}{((T_{wl} p+1+\chi))}}=$$

$$e^{-\frac{\tau}{T_L}\cdot\frac{(T_L p+1)}{1}\cdot\frac{-\chi}{T_{wl} p+1+\chi}}=e^{-\tau p}e^{\frac{-\tau\chi}{T_L(1+\chi)}}e^{\frac{1}{T_{wl1}p+1}}=$$

$$e^{-\tau p}e^{\frac{-\tau\chi}{T_L(1+\chi)}}\cdot\left(\frac{b_1 p+b_2}{T_{wl1}p+1}\right);\ T_{wl1}=\frac{T_{wl}}{1+\chi};$$

$$k=\frac{\tau\chi}{T_L(1+\chi)};b_2=e^k; \qquad (25)$$

$$b_1=T_{wl1};\ c(p)=\left(\frac{b_1 p+b_2}{T_{wl1}p+1}\right).$$

где, $\tau=\frac{L}{v}$, $v-$ средняя скорость хладагента, $L-$средняя длина пути хладагента в трубопроводе;

для противоточного теплообменника уравнения (25) будут иметь вид:

$$e^{\frac{\tau}{a(p)}}=e^{\frac{\tau}{T_L}\frac{(T_L p+1)(T_{wl} p+1+\chi)-\chi}{((T_{wl} p+1+\chi))}}=$$

$$e^{\frac{-\tau}{T_L}\cdot\frac{(T_L p+1)}{1}\cdot\frac{\chi}{T_{wl} p+1+\chi}}=e^{-\tau p}e^{\frac{-\tau\chi}{T_L(1+\chi)}}e^{\frac{1}{T_{wl1}p+1}}=$$

$$e^{-\tau p}e^{\frac{-\tau\chi}{T_L(1+\chi)}}\cdot\left(\frac{b_1 p+b_2}{T_{wl1}p+1}\right); \qquad (26)$$

$$k=\frac{-\tau\chi}{T_L(1+\chi)};b_2=e^k;$$

$$b_1=T_{wl1};\ c(p)=\left(\frac{b_1 p+b_2}{T_{wl1}p+1}\right),$$

В настоящей работе рассматривается система управления теплообменниками типа «труба в трубе», кожухозмеевиковыми и им подобными, где площадь поверхности теплопередачи регулируется изменением положения теплопроводящей вставки между греющей и нагреваемой трубами. Поэтому рассмотрим уравнения статики для противоточного теплообменника с управляемой вставкой.

Преимуществом данного технического решения примененного для регулирования режима работы теплообменного аппарата является простота, недостатком –большая инерционность процесса регулирования из-за необходимости использования теплопередающей вставки.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННИКА

Как показано в [1], изображение зависимости температуры на выходе из прямоточного теплообменника в зависимости от температуры на входе в теплообменник имеет вид:

$$T_2(p,L)=T_1(p)b(p)\left(1-e^{-\frac{\tau}{a(p)}}\right), \qquad (27)$$

Из сравнения формул (25) и (26) становится видным отличие динамических моделей противоточного и прямоточного теплообменников.

Если в уравнении (21) выражение в скобках упростить, то получим следующее выражение:

$$T_2(p,L)=T_1(p)\cdot b(p)\cdot e^{-\tau p}\cdot e^k\cdot c(p), \qquad (28)$$

Поскольку возможны различные виды аппроксимаций выражения $e^{-\frac{\tau}{a(p)}}$, то считаем объект управления, объектом с неопределенными параметрами.

$$\begin{aligned}
&-v_l\cdot m_l\cdot c_l\cdot l_{\max}^{-1}\cdot\frac{\partial T_l}{\partial u}+\alpha_l\cdot F_{l\max}\cdot(T_l-T_{wl})=0\\
&\alpha_l\cdot F_{l\max}\left(T_l-T_{wl}\right)-k_l\cdot F_{l\max}\cdot\left(T_l-T_{wst}\right)=0\\
&v_h\cdot m_h\cdot c_h\cdot l_{\max}^{-1}\cdot\frac{\partial T_h}{\partial u}-\alpha_h\cdot F_{h\max}\cdot(T_{wh}-T_h)=0 \qquad (29)\\
&-\alpha_h\cdot\frac{F_{l\max}}{k_F}\cdot\left(T_{wh}-T_h\right)-k_h\cdot F_{h\max}\cdot\left(T_{wh}-T_{wst}\right)=0\\
&-k_h\cdot\frac{F_{h\max}}{k_F}\cdot\left(T_{wh}-T_{wst}\right)+k_l\cdot F_{l\max}\cdot\left(T_{wl}-T_{wst}\right)=0
\end{aligned}$$

Рассмотрим структурную схему системы управления теплообменником с регулируемой поверхностью теплообмена (ТОР). Для расчета вида и параметров нелинейного элемента, расположенного перед звеном передаточной функции теплообменника по каналу температуры на выходе-температура на входе в теплообменник рассмотрим, для примера, решение уравнений статики противоточного теплообменника:

Рассмотрим решение системы (1)-(5), но без множителя u в первом и третьем уравнении. Тогда получаем систему обыкновенных алгебраически-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

Разделим эту систему из пяти уравнений на две системы. Первая состоит из двух дифференциальных уравнений первого порядка

$$a_l \frac{dT_l}{du} = b_l \left(T_l - T_{wl} \right)$$
$$a_h \frac{dT_h}{du} = b_h \left(T_{wh} - T_h \right) \qquad (30)$$

В (30) $a_l = v_l m_l c_l l_{\max}^{-1}$, $a_h = v_h m_h c_h l_{\max}^{-1}$, $b_l = \alpha_l F_{l\max}$, $b_h = \alpha_h F_{h\max}$. Вторую систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных функций T_{wl} T_{wh} и T_{wst} получим из 2-го, 4-го и 5-го уравнений системы (29). После некоторых упрощений получим уравнение (31)

$$\begin{cases} -a_l T_{wl} + k_l T_{wst} = \left(k_l - a_l \right) T_l \\ -\left(\alpha_h \dfrac{F_{l\max}}{k_F} + k_h F_{h\max} \right) T_{wh} + k_h F_{h\max} T_{wst} = \alpha_h \dfrac{F_{l\max}}{k_F} \\ k_l F_{l\max} T_{wl} - k_h \dfrac{F_{h\max}}{k_F} T_{wh} \left(k_h \cdot \dfrac{F_{h\max}}{k_F} - k_l F_{l\max} \right) k_l T_{wst} = 0 \end{cases} \qquad (31)$$

Разрешая систему (31) относительно T_{wl} и T_{wh}, получим

$$T_{wl} = \frac{F_{l\max} k_F k_l T_l \alpha_h \left(k_l - a_l \right) + F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l T_l \left(k_l - a_l \right) - \alpha_h \left(k_l \left(T_h + T_l \right) - T_l a_l \right) \right)}{F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \left(k_l - a_l \right) + F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l \left(k_l - a_l \right) + \alpha_h a_l \right)} \qquad (32)$$

$$T_{wh} = \frac{F_{l\max} k_F k_l T_h \alpha_h \left(-k_l + a_l \right) + F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l T_l \left(k_l - a_l \right) - T_h \alpha_h a_l \right)}{F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \left(k_l - a_l \right) + F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l \left(k_l - a_l \right) + \alpha_h a_l \right)} \qquad (33)$$

Перепишем (32) и (33) в виде

$$Z = F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \left(k_l - a_l \right) + F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l \left(k_l - a_l \right) + \alpha_h a_l \right) \qquad (34)$$

$$T_{wl} = \frac{\left(F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l - \alpha_h \right) + F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \right) \left(k_l - a_l \right) T_l - F_{h\max} k_h k_l \alpha_h T_h}{Z} \qquad (35)$$

$$T_{wh} = \frac{F_{h\max} k_F^2 k_h k_l \left(k_l - a_l \right) T_l + \left(F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \left(a_l - k_l \right) - F_{h\max} k_h \alpha_h a_l \right) T_h}{Z} \qquad (36)$$

или

$$T_{wl} = \beta_{11} T_l + \beta_{12} T_h ; \qquad (37)$$

$$T_{wh} = \beta_{21} T_l + \beta_{22} T_h . \qquad (38)$$

Здесь

$$\beta_{11} = \frac{F_{h\max} k_h \left(k_F^2 k_l - a_h \right) + F_{l\max} k_F k_l \alpha_h \left(k_l - a_l \right)}{Z}, \beta_{12} = -\frac{F_{h\max} k_h k_l a_h}{Z}$$
$$\beta_{21} = \frac{F_{h\max} k_F^2 k_h k_l \left(k_l - a_l \right)}{Z}, \beta_{22} = \frac{F_{l\max} k_F k_l a_h \left(a_l - k_l \right) - F_{h\max} k_h a_h a_l}{Z} \qquad (39)$$

$$\frac{dT_l}{du} = a_{11}T_l - a_{12}T_h$$
$$\frac{dT_h}{du} = a_{21}T_l - a_{22}T_h \qquad (40)$$

Здесь введены обозначения

$$a_{11} = \frac{b_l\left(1-\beta_{11}\right)}{a_l}, a_{12} = \frac{b_l\beta_{12}}{a_l},$$
$$a_{21} = \frac{b_h\beta_{21}}{\alpha_h}, a_{22} = \frac{b_h\left(1-\beta_{22}\right)}{\alpha_h} \qquad (41)$$

Для решения системы (40) введем вектор неизвестных функций $\bar{z} = \begin{pmatrix} T_l \\ T_h \end{pmatrix}$. Тогда система (40) может быть представлена в векторно-матричном виде, как

$$\frac{d\bar{z}}{du} = A\bar{z}, \bar{z} = \begin{pmatrix} T_l \\ T_h \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} \frac{b_l(1-\beta_{11})}{a_l} & \frac{b_l\beta_{12}}{a_l} \\ \frac{b_h\beta_{21}}{a_h} & \frac{b_h(1-\beta_{22})}{h} \end{pmatrix} \qquad (42)$$

Обозначим через k_1, k_2 и $\bar{w}_1, \bar{w}_2$ собственные числа и собственные вектора матрицы A. Введем матрицу собственных векторов $Q = \left(\bar{w}_1, \bar{w}_2\right)$. Тогда матрицу A можно привести к диагональному виду по формулам

$$A = Q\Lambda Q^{-1}, \Lambda = Q^{-1}AQ, \Lambda = \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \qquad (43)$$

Подставим (43) в систему (42), умножим систему слева на Q^{-1} и введем новый вектор неизвестных $\bar{q} = Q^{-1}\bar{z}$.Тогда для компонент вектора $\bar{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}$ получаем два несвязанных дифференциальных уравнения

$$\frac{dq_1}{du} = k_1 q_1, \frac{dq_2}{du} = k_2 q_2 \qquad (44)$$

решением которых являются функции

$$q_1\left(u\right) = c_1 e^{k_1 u}, q_2\left(u\right) = c_2 e^{k_2 u} \qquad (45)$$

где c_1 и c_2 – две произвольные постоянные.

Тогда решением системы (40) является вектор

$$\bar{z} = \begin{pmatrix} T_l \\ T_h \end{pmatrix} = Q\bar{q} = Q\left(c_1 e^{k_1 u}, c_2 e^{k_2 u}\right) =$$
$$= c_1\bar{w}_1 e^{k_1 u} + c_2\bar{w}_2 e^{k_2 u}. \qquad (46)$$

Собственные числа k_1, k_2 и собственные вектора $\bar{w}_1$ $\bar{w}_2$ матрицы A

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \qquad (47)$$

определяются по следующему способу. Найти собственные значения значит, что нужно найти такие числа k, для которых существует ненулевое решение однородной задачи $A\bar{w} = k\bar{w}$ или $\left(A - kE\right)\bar{w} = 0$. Т.е. найти такие k для которых существует ненулевой вектор решения $\bar{w} \neq 0$ однородной системы уравнений. Однородная система $\left(A - kE\right)\bar{w} = 0$ в покомпонентной записи имеет вид

$$\begin{cases} \left(a_{11} - k\right)w_1 + a_{12}w_2 = 0 \\ a_{21}w_1 + \left(a_{22} - k\right)w_2 = 0 \end{cases} \qquad (48)$$

Однородная система (48) имеет ненулевые решения только в случае, если определитель этой системы равен нулю, т.е. для определения собственных значений k имеем уравнение

$$\det\left(A - kE\right) = \begin{vmatrix} a_{11} - k & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - k \end{vmatrix} =$$
$$= \left(a_{11} - k\right)\left(a_{22} - k\right) - a_{12}a_{21} = 0 \qquad (49)$$

$$k^2 - \left(a_{11} + a_{22}\right)k + \left(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}\right) = 0 \qquad (50)$$

Обозначим корни уравнения (50) через k_1, k_2. Теперь для нахождения собственных векторов соответствующих собственным значениям k_1 k_2 нужно найти ненулевые решения системы (48) при $k = k_i, i = 1,2$ Решая эти системы, получаем собственные вектора

$$\bar{w}_1 = \left(-\frac{a_{22}}{a_{11} - k_1}d_1 \Big/ d_1\right),$$
$$\bar{w}_2 = \left(-\frac{a_{12}}{a_{11} - k_2}d_2 \Big/ d_2\right), \qquad (51)$$

где через d_1, d_2 обозначены произвольные постоянные. Эти постоянные можно определить из требования, чтобы нормы

векторов $\overline{w}_1$ и $\overline{w}_2$ были равны единице. Тогда

$$d_i^2\left(1+\left(\frac{a_{12}}{a_{11}-k_i}\right)^2\right)=1, i=1,2$$

или

$$d_i=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{a_{12}}{a_{11}-k_i}\right)^2}}, i=1,2 \qquad (52)$$

Для оценки зависимости среднего значения температуры греющего агента от длины теплообменника $k(x_1)$ проинтегрируем выражение (46) в диапазоне от $0...x_1$ и разделим его на $x_1(x_1=0...L)$. Получим:

$$k(x_1)=\int_0^{x1}\Delta T_h(x)dx \Big/ x_1 \qquad (53)$$

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОМ

Управление температурой нагреваемого теплоносителя в теплообменных аппаратах осуществляется:

- изменением температуры греющей среды (теплообменники тепловых насосов, теплообменные аппараты, которыми нагружены котлы, ТЭЦ и др.);
- изменением расходов, как греющей, так и нагреваемой сред;
- изменением конструктивных параметров теплообменника, например, изменением площади поверхности теплообмена.
- изменением конструктивных параметров теплообменника, например, изменением площади поверхности теплообмена.

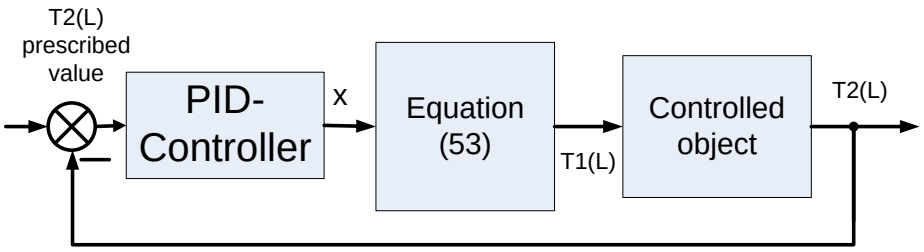


Рис.2. Схема САУ. (Fig.2. Automatic control system scheme).

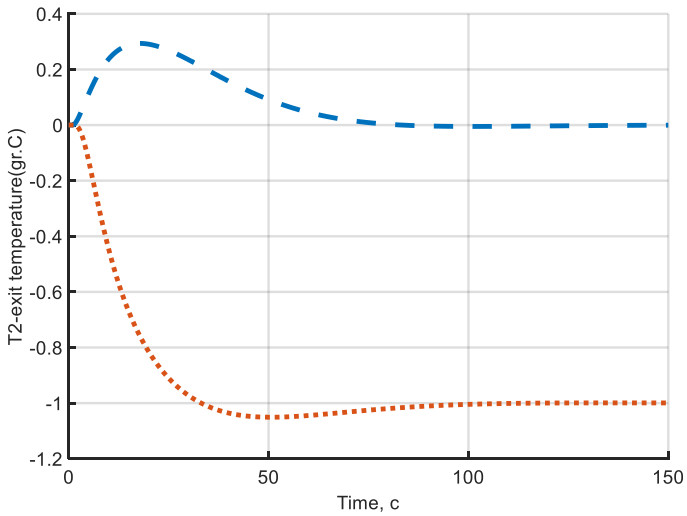


Рис.3. Температура нагреваемого потока на выходе теплообменника (пунктирная линия) и ход вставки (точечная линия) в функции времени (САУ с ПИД).
Fig.3. Temperature curve (dashed line) and movement of the insert (dotted line) as a function of time (PID control).

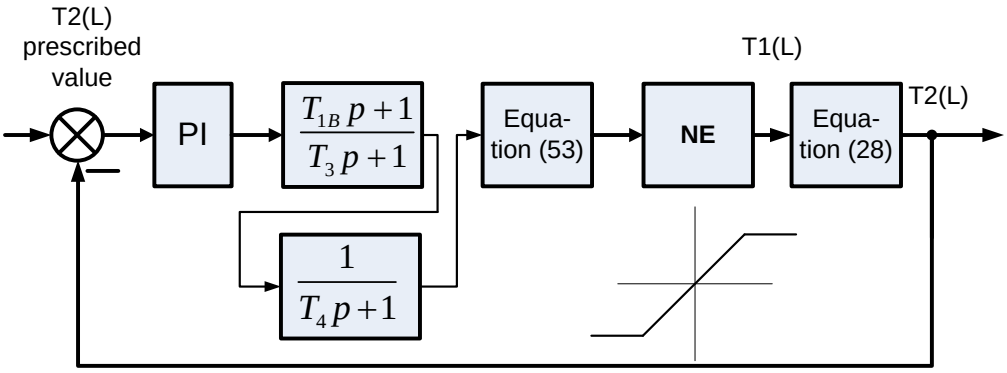


Рис.4. Схема САУ с последовательным корректирующим звеном.
Fig.4. Automatic control system scheme with corrective block).

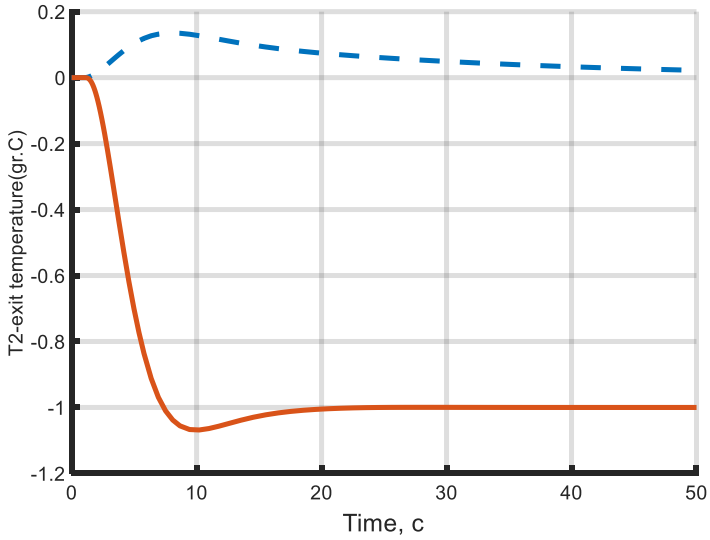


Рис.5. Температура нагреваемого потока на выходе теплообменника (пунктирная линия) и ход вставки (точечная линия) в функции времени (система с корректирующим звеном).
Fig.5. Temperature curve (dashed line) and movement of the insert (solid line) as a function of time (system with correction).

Последний способ не нашел широкого распространения на практике, ввиду ряда ограничений конструктивного характера. Так изменение площади поверхности теплообмена в погружных теплообменниках может осуществляться путем изменения степени погружения змеевика. Система, реализующая подобный алгоритм, естественно, достаточно сложная.

В настоящей работе рассматривается система управления теплообменниками типа «труба в трубе», кожухозмеевиковыми и им подобными, площадь поверхности теплопередачи регулируется изменением положения теплопроводящей вставки между греющей и нагреваемой трубами. Преимуществом данного решения является простота, недостатком – несколько повышенная инерционность регулирования из-за необходимости использования теплопередающей вставки.

Рассмотрим структурную схему системы управления теплообменником с регулируемой поверхностью теплообмена (ТОР).

Объект управления описывается уравнением (27) в динамике и системой (30, 31) в статике. Если вставка перемещается, например, от входа холодного теплоносителя ко входу горячего теплоносителя, то температура холодного теплоносителя падает соответствии с графиком, изображенным на рисунке Ф. Структурная схема САУ теплообменником с последовательным корректирующим звеном имеет следующий вид (рис. 4).

Здесь T_{1B} – наибольшая постоянная времени в звене $b(p)$ (см. уравнение 28). T_3 – постоянная времени реального дифференцирующего звена (инерционно-форсирующего звена, $T_{1B} > T_3$).

Зависимость между перемещением вставки и изменением температуры нагреваемого теплоносителя в статике имеет вид (рис.5).

Из сравнения графиков рис 3 и рис.5 становится видно, что благодаря введению последовательной коррекции приблизительно в 2 раза снижается перерегулирование выходной температуры, время переходного процесса снижается в 2,5 раза. Фильтр нижних частот, установленный сразу после корректирующего звена, позволяет устранить вибрации привода вставки в переходном и установившемся режиме работы.

Заключение

1. Разработаны статическая и динамическая модели теплообменника типа «труба в трубе» с регулируемой теплопроводящей вставкой между трубами греющего и нагреваемого теплоносителя, в которых учтены теплофизические свойства теплоносителей, тепловые сопротивления между вставкой и трубами, расходы, температуры и давления движущихся сред, размеры аппарата.
2. Разработана методика решения дифференциально-интегральных уравнений статики теплообменника с теплопроводящей вставкой, позволившая аналитически выразить отношение среднеинтегральных значений температур теплоносителей в теплообменнике в зависимости от длины теплообменника, что позволяет построить систему управления теплообменником с переменной площадью поверхности теплообмена, определить рациональные области применения таких теплообменников с учетом требований к быстродействию и качеству переходных процессов.
3. Получены передаточные функции для противоточного и прямоточного теплообменников по каналу «температура на выходе нагреваемой среды»-«температура греющей среды на входе в теплообменник».
4. С использованием языка моделирования на языке программирования Матлаб и графической среды имитационного моделирования Симулинк установлено, что переходные процессы при скачкообразном возмущении температуры греющей среды на входе в теплообменник при работе как с ПИД-регулятором, так и с последовательным корректирующим звеном, включенным после ПИД-регулятора носят апериодический характер, причем последовательное корректирующее звено снижает время переходного процесса на 40-60%.

Литература (References)

[1] Dudnikov E.G. Avtomaticheskoe upravlenie v himicheskoi promishlennosti. [Automatic control in chemical industry]. Mashinostroenie, 1987. 368 p.

[2] Automatic control of a heat exchanger with changing operation conditions. http://www.mathematik.tu-dortmund.de/papers/BayazitBicerKulaliMueminogluTorres2008.pdf (accessed 23.04.2019).

[3] Applying heat exchanger control strategies. https://www.controleng.com/articles/applying-heat-exchanger-control-strategies/ (accessed 23.04.2019).

[4] Saji K. S. and Sasi Kumar M. PI-Controller Tuning for Heat Exchanger with Bypass and Sensor. International Journal of Electrical Engineering. ISSN 0974-2158 Volume 5, Number 6 (2012), pp. 679-689.

[5] Vasickaninová A., Bakosová M., Mészáros A., Klemes J.J. Neural Network Predictive Control of a Heat Exchanger. Applied Thermal Engineering, V31 (2011), pp.2094-2100.

[6] Fisher M., Nelles O., Isermann R. Adaptive predictive control of a heat exchanger based of fuzzy model. Control Engineering Practice 6 (1998) 259-269.

[7] Shinskey G.F. PID dead – time control of distributed processes. Control Engineering Practice 9 (2001) 1177–1183.

[8] Laszczyk P. Simplified modeling of liquid-liquid heat exchangers for use in control systems. Applied Thermal Engineering. 119 (2017) pp.140–155.

[9] Salam K. Al-Dawery, Ayham M. Alrahawi, Khalid M. Al-Zobai Dynamic modeling and control of plate heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 6873–6880.

[10] Álvarez J.D., Yebra L.J., Berenguel M. Repetitive control of tubular heat exchangers, J. Process Control 17 (9) (2007) 689-701. doi:10.1016/j.jprocont.2007.02.003.

[11] K. Varshney, P.K. Panigrahi, Artificial neural network control of a heat exchanger in a closed flow air circuit, Appl. Soft Comput. 5 (4) (2005) 441-465. doi:10.1016/j.asoc.2004.10.004.

[12] Bakosova M, Oravec J. Robust model predictive control for heat exchanger network. Applied Thermal Engineering 73 (2014) 924-930.

[13] Klemes J.J., Varbanov P.S., Heat integration including heat exchangers, combined heat and power, heat pumps, separation processes and process control, Appl. Therm. Eng. 43 (2012) 1-6,

http://dx.doi.org/10.1016/j.aptmaleng.2012.03.044.

[14] Arbaoui M.A., Vernieres-Hassimi L., Seguin D., Abdelghani-Idrissi Counter-current tubular heat exchanger: modeling and adaptive predictive functional control, Appl. Therm. Eng. 27 (2007) 2332-2338, http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.027.

[15] Oravec J., Bakošová M., Mészáros A., Míková N. Experimental investigation of alternative robust model predictive control of a heat exchanger. Applied Thermal Engineering 105 (2016) 774–782.

[16] Wang Yaran, You Shijun, Zheng Wandong, Zhang Huan, Zheng Xuejing, Miao Qingwei State space model and robust control of plate heat exchanger for dynamic performance improvement. Applied Thermal Engineering 128 (2018) 1588–1604.

[17] Vasickaninová A., Bakošová M., Cirka L., Kalúz M., Oravec J. Robust controller design for a laboratory heat exchanger. Applied Thermal Engineering 128 (2018) 1297–1309.

[18] Borkar Pravin Kumar, Agrawal G.K, Qureshi M.F, Jha Manoj Efficient Hybrid Control of Shell and Tube Heat Exchanger Using Interval Type-2 and Adaptive Neuro Fuzzy Based Fuzzy Inference System. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. V3. Issue 11, 2014, 17528-17542.

[19] Vasičkaninova A., Bakošova M. Application of H2 and H∞ Approaches to the Robust Controller Design for a Heat Exchanger. Chemical Engineering Transactions. 35, 463-468 DOI:10.3303/CET1335077.

[20] Subhransu Padhee Controller Design for Temperature Control of Heat Exchanger System: Simulation Results. WSEAS Transactions on Systems and Control, V9., 2014, 485-491.

Сведения об авторах.

Шит Михаил Львович – к.т.н., в.н.с. лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» института энергетики. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами. E-mail: mihail_sit@mail.ru

Бурчиу Виталий Иванович – к.т.н. заведующий лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» института энергетики. Область научных интересов: тепловые насосы, возобновляемые источники энергии.
E-mail: vburciu@gmail.com

Тимченко Дмитрий Викторович – ведущий инженер – программист Института энергетики Молдовы. Область научных интересов: программирование микропроцессоров.
E-mail: dimmy@bk.ru

Пацюк Владимир Ильич к.ф.м.н., доцент Молдавского государственного университета, ведущий научный сотрудник Института энергетики. Области научных интересов: математическая физика, численный анализ, теоретическая механика и теоретическая электротехника.
E-mail: patsiuk@mail.ru

Журавлев Анатолий Александрович – кандидат технических наук, в.н.с. лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» института энергетики. Область научных интересов: микропроцессорные системы управления, промышленная автоматика.
E-mail: AZhur5249@mail.ru

Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regeneration

Cherednichenko O.C.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The issues of improving the efficiency of methanol usage as a promising marine power plant fuel with low carbon content are discussed. The main aim of the research is an analysis of characteristics of advanced marine gas turbine power plants with the combined thermodynamic and thermochemical regeneration of waste heat. The possible methanol conversion at the expense thermochemical heat regeneration of marine engines recoverable resources has been revealed. The analysis of parameters influences of the waste heat recoverable resources, as well as restrictions related to the engine system of gas fuel injection, on the efficiency of methanol conversion has been carried out. It was demonstrated that the simulation of methanol steam conversion processes results in the pressure increase in the reactor, which, in its turn, causes a shift of conversion efficiency process towards higher temperature area. The calculation scheme of steam injection gas turbine plant with the joint thermodynamic and thermochemical regeneration of waste heat is demonstrated. The results of mathematical simulation of the processes in regeneration plant under the 3.4 MW constant capacity and heat exchanger thermal ratio of 0.85 were obtained. The cycle optimization has been based on the efficiency of plant under the conditions of variation of water/methanol ratio and gas temperatures in thermochemical regenerator. The efficiency increase constituted 4% relative to characteristics of the base engine operating on methanol. The estimation of carbon content in produced syngas has shown that thermochemical regeneration of methanol conversion by using the waste heat can reduce the energy efficiency by 1.5 times.
***Keywords*:** ship power plant, methanol reforming, thermochemical regeneration, gas turbine engine, waste heat.
DOI: 10.5281/zenodo.2650429

Analiza eficacității utilizării etanolului pentru instalațiile cu turbine cu gaz ale navelor cu recuperarea termochimică a căldurii gazelor de eșapament

Cerednichenko A.K.
Universitatea Națională de Construcții Navale în numele amiralului Makarov
Nikolaev, Ucraina

Rezumat. Acest articol abordează aspecte legate de îmbunătățirea eficienței utilizării metanolului, ca un combustibil marin de perspectivă cu conținut redus de carbon. Scopul principal al cercetării constă în analiza caracteristicilor instalațiilor navale de persepctivă cu turbine cu gaze cu regenerare termodinamică și termochimică concomitentă la funcționarea cu produse de conversie ale combustibililor de hidrocarburi. Pentru atingerea acestui scop al studiului a fost efectuată o analiză comparativă a caracteristicilor combustibililor alternativi și tradiționali a navelor, ceea ce a evidențiat indicatorii-cheie care afectează indicele de eficiență energetică. Sunt identificate aspectele legate de sporirea eficienței utilizării gazului de sinteză produs ca combustibil obținut prin recuperarea termochimică a căldurii resurselor energetice secundare ale motoarelor navale. Influența asupra eficienței conversiei parametrilor de resurse secundare de energie și a limitărilor asociate cu sistemul de alimentare cu combustibil gazos la motor sunt analizate folosind metode matematice de modelare. Din rezultatele de simulare a proceselor de conversie a metanolului, rezultă că creșterea presiunii în reactor duce la o schimbare a eficienței conversiei într-o zonă cu temperaturi mai ridicate. A fost elaborată o schemă pentru o unitate de turbină cu gaz de contact cu regenerare termodinamică și termochimică. Se prezintă principalele prevederi ale modelului matematic și rezultatele modelării matematice ale proceselor din instalația regenerativă pentru puterea fixă de 3,4 MW, gradul de regenerare de 0,85 și temperatura gazului la intrarea în turbină egală cu 1270 K. Optimizarea ciclului a fost efectuată în funcție de eficiența instalației prin modificarea raportului apă / metanol și a temperaturii gazului după regeneratorul termodinamic.
Cuvinte-cheie: instalații energetice, electrice, conversie metanol, recuperare termochemică de căldură, motor cu turbină cu gaz, căldură gazelor de eșapament.

© Чередниченко А.К., 2019

Анализ эффективности применения метанола для судовой газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла отходящих газов

Чередниченко А.К.
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
Николаев, Украина

Аннотация. В данной статье обсуждаются аспекты повышения эффективности применения метанола, как перспективного судового топлива с низким содержанием углерода. Основной целью исследования является анализ характеристик перспективных судовых газотурбинных установок с совместной термодинамической и термохимической регенерацией при работе на продуктах конверсии углеводородных топлив. Для достижения цели исследования проведен сравнительный анализ характеристик альтернативных и традиционных судовых топлив, который выявил ключевые показатели, влияющие на индекс энергоэффективности. Выявлены аспекты повышения эффективности применением в качестве топлива синтез-газа, полученного за счет термохимической регенерации тепла вторичных энергоресурсов судовых двигателей. Методами математического моделирования проанализировано влияние на эффективность конверсии параметров вторичных энергоресурсов и ограничений, связанных с системой подачи газообразного топлива в двигатель. Из результатов моделирования процессов конверсии метанола следует, что повышение давления в реакторе приводит к смещению эффективности конверсии в зону более высоких температур. Разработана схема контактной газотурбинной установки с совместной термодинамической и термохимической регенерацией. Приведены основные положения математической модели. Представлены результаты математического моделирования процессов в регенеративной установке в условиях фиксированной мощности 3,4 МВт, степени регенерации 0,85 и температуры газов перед турбиной 1270 К. Оптимизация цикла проводилась по коэффициенту полезного действия установки при варьировании отношения вода/метанол и температуры газов за термодинамическим регенератором. Рост коэффициента полезного действия составил 4% по отношению к параметрам базового двигателя, работающего на метаноле. Расчет содержания углерода в полученном синтез-газе показал, что термохимическая регенерация сбросного тепла с паровой конверсией метанола позволяет снизить значение коэффициента энергоэффективности в 1,5 раза. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергетических установок перспективных судов.

Ключевые слова: энергетическая установка, конверсия метанола, термохимическая регенерация тепла, газотурбинный двигатель, тепло отходящих газов.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая экономика продолжает расти, что частично обусловлено глобальным ростом населения. В тоже время свыше 80% роста стимулируется усиливающимся влиянием на мировую экономику большого и растущего среднего класса в странах с развивающейся экономикой [1]. Эта тенденция вызывает рост мировой торговли и усиливает влияние транспортной системы и, главным образом, ее основной компоненты – транспортировки грузов морем. Согласно отчету United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) свыше 70% стоимости мировой торговли перевозится на борту судов [2]. В 2017 г. общий объем перевезенного водным путем груза составил 10,7 млрд. тонн. При этом среднесрочные прогнозы развития морских перевозок предполагают ежегодный рост на 3,8 % на период 2018 – 2023 гг. [3].

Повышения эффективности использования потенциала энергоносителей в совокупности с минимизацией ущерба окружающей среде – парадигма проектирования энергетического оборудования в современном мире. В связи с этим, требования законодательных актов *IMO* (*International Maritime Organization*) жестко регламентируют выбросы вредных веществ от объектов судоходства. Согласно резолюциям *IMO* для каждого нового судна валовой вместимостью ≤ 400 т необходимо определять требуемый *(Required)* и достижимый *(Attained)* конструктивный индекс энергетической эффективности судна *EEDI (Energy Efficiency Design Index)*, а также операционный индекс *EEOI (Energy Efficiency Operational Index)* при проектировании, постройке и эксплуатации судна [4]. *EEDI* вычисляется в зависимости от типа судна и дедвейта с учетом поправочного коэффициента, который постепенно будет ужесточаться вплоть до 2025 г. *Attained EEDI* вычисляется в соответствии с методикой *IMO* и должен быть $\geq$ *Required EEDI*. Физический смысл индексов идентичен и представляет собой отношение массы произведенного энергетической установкой судна парникового газа CO_2 к величине транспортной работы судна, г CO_2/т-миль:

$$EEDI = CO_2 emission/Transport\ work = \\ = Engine\ power \times SFC \times C_F/(DWT \times speed). \quad (1)$$

Требования IMO непосредственно связаны с повышением эффективности использования энергии топлива в судовой энергетике и применением альтернативных топлив. Это формирует запрос практики, направленный на адаптацию энергосберегающих технологий в судовую энергетику, разработку перспективных схем транспортных энергокомплексов, а также исследование процессов в судовом энергетическом оборудовании.

Современные малооборотные дизельные двигатели (МОД) являются основой судовой энергетики. Они имеют высокий КПД, превышающий 50 % и большую агрегатную мощность, что обеспечило возможность применения таких двигателей на большинстве типов морских транспортных судов [5]. Достаточно широко в судовой энергетике представлены и среднеоборотные (СОД) дизельные двигатели с механической или электрической передачей мощности на движитель. Некоторое распространение на коммерческом флоте получили турбинные установки, в том числе с газотурбинными двигателями (ГТД). Так только основной производитель морской газотурбинной техники (43% рынка) компания GE поставила 86 ГТД для 47 газотурбинных (ГТУ) и комбинированных установок коммерческих судов.

Утилизация вторичных энергоресурсов тепловых двигателей позволяет повысить эффективность использования энергии топлива в судовой пропульсивной установке. Анализ перспективных путей повышения энергоэффективности выявил термохимические технологии, предусматривающие конверсию углеводородных и альтернативных топлив, преобразование энергии в металлогидридных утилизационных установках, использование плазмохимических систем горения [6–12]. К этой группе относятся энергетические установки с термохимической конверсией углеводородных топлив за счет вторичных энергоресурсов тепловых двигателей. Физическую основу таких установок формирует совокупность процессов, в результате которых под влиянием тепла вторичных энергоресурсов, которое отбирается от них в утилизационном устройстве, осуществляются реакции химического преобразования топлива с образованием синтез-газа. При этом уменьшается расход топлива и выбросы парниковых газов [6]. Исследования применимости таких технологий проводятся достаточно широко, но в большей мере касаются стационарной энергетики и наземного транспорта [13–18]. В существующих публикациях практически отсутствует анализ влияния ограничений, связанных с системой подачи газообразного топлива в двигатель, на эффективность термохимической конверсии базового топлива. Недостаточно внимания уделено исследованию характеристик судовых газотурбинных установок сложных циклов с применением в качестве топлива продуктов конверсии углеводородных энергоносителей.

Таким образом, актуальна проблема определения диапазона применимости в судовой энергетике перспективных термохимических технологий конверсии углеводородных топлив.

Цель данного исследования состоит в анализе характеристик перспективных судовых газотурбинных установок с совместной термодинамической и термохимической регенерацией при работе на продуктах конверсии метанола.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для большинства транспортных судов основная составляющая выбросов CO_2 продуцируется двигателем или группой двигателей пропульсивной установки. Как видно из анализа формулы (1), сокращение выбросов CO_2 может быть достигнуто как уменьшением расхода топлива (*Engine power x SFC*), так и применением топлива с низким содержанием углерода (учитывается индексом C_F). В условиях допущения, что мощность пропульсивной установки, дедвейт и скорость судна могут быть приняты постоянными, влияние на конструктивный индекс энергетической эффективности судна *EEDI* оказывают только удельный расход топлива *SFC* и коэффициент содержания углерода в топливе C_F

$$EEDI = K \times SFC \times C_F,$$

где

$$K = Engine\ power\ /\ DWT \times speed, \text{ кВт/т-миль}$$

Удельный расход топлива обратно пропорционально зависит от низшей располагаемой теплотворной способности топлива *LCV* (*Lower calorific value*). Таким образом, при

принятых допущениях, индекс *EEDI* является функцией от характеристик топлива:

$$EEDI = f\,(C_F\,/LCV).$$

Наиболее широко в качестве топлива для судовых двигателей представлено тяжелое топливо HFO. С учетом того, что нормативные требования IMO к эмиссии CO_2 ужесточаются на каждом новом этапе, применение топлива HFO на Этапах 2 (2020-2024 гг.) и 3 (с 2025 г.) без дополнительного громоздкого оборудования и дорогостоящих мероприятий представляется бесперспективным. В настоящее время ведущие производители судовых дизельных двигателей адаптировали свою продукцию для работы на метане и других альтернативных видах топлива. Характеристики основных судовых топлив представлены в табл. 1.

Таблица 1[1].

Характеристики основных судовых топлив [4][2]

Тип топлива	Обозначение топлива	Содержание углерода	C_F, т CO_2/т топлива	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
Дизельное/газойль (MDO)	ISO 8217 DMX…DMB	0,8744	3,206	42,700
Легкое (LFO)	ISO 8217 RMA…RMD	0,8594	3,151	41,200
Тяжелое (HFO)	ISO 8217 RME…RMK	0,8493	3,114	40,200
Сжиженный нефтяной газ (LPG)	Пропан	0,8182	3,000	46,300
	Бутан	0,8264	3,030	45,700
Сжиженный природный газ (LNG)	LNG	0,7500	2,75	48,000
Метанол (Methanol)	Метанол	0,3750	1,375	19,900
Этанол (Ethanol)	Этанол	0,5217	1,913	26,800

Представляет интерес сопоставление характеристик, влияющих на индекс энергетической эффективности судна для основного и альтернативных судовых топлив. На рис. 1 представлено сравнение с характеристиками тяжелого топлива HFO (его показатели приняты за 1,00).

Из анализа диаграммы следует, что применение газообразных топлив LPG и LNG позволяет, при прочих равных условиях, снизить индекс EEDI до 15…17 % (пропан, бутан) и 26 % соответственно, по сравнению с использованием HFO. При работе двухтопливных МОД на газообразном топливе около 3–5 % приходится на запальную дозу жидкого топлива («пилотное» топливо), которым является MDO. Газообразное топливо подается в двигатель под высоким давлением. Затраты мощности на привод компрессорной установки подачи газообразного топлива могут составлять до 2,8–3,0% мощности двигателя [5]. С учетом этих факторов применение в качестве судового топлива бутана, вместо традиционного HFO, обеспечивает снижения индекса *EEDI* до 13 %, пропана – до 15 %, а сжиженного природного газа – до 24 %.

[1,2,3] Appendix 1

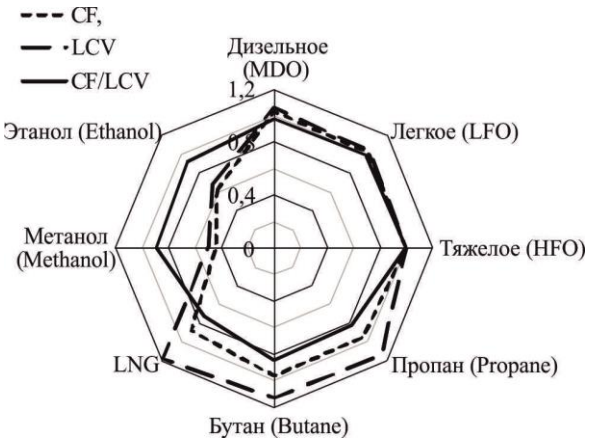


Рис. 1. Сопоставление характеристик топлива HFO и альтернативных топлив.[3]

Несмотря на то, что метанол и этанол является топливами с низким содержанием углерода, малая низшая располагаемая теплотворная способность таких топлив сдерживает эффективность их применения. Паровая конверсия спиртов позволяет получить газо-

образное топливо с лучшими энергетическими и экологическими характеристиками.

Согласно результатам предыдущих исследований, температурный потенциал вторичных энергоресурсов МОД (460…515 К в условиях ISO 3046/1-2002) не позволяет достаточно эффективно осуществлять конверсию углеводородных топлив. Уровень температур вторичных энергоресурсов СОД (620…720 К) дает возможность удовлетворительной конверсии метанола и умеренной конверсии этанола. Для располагаемого температурного диапазона отходящих газов современных серийных ГТД (620…850 К) возможна частичная конверсия природного газа, бутана, пропана, этана, метана, а также эффективная конверсия метанола, этанола [7, 8]. Представляет интерес исследование условий эффективной паровой конверсии метанола, как одного из наиболее перспективных видов судовых топлив, при термохимической регенерации тепла отходящих газов судовых двигателей.

Паровая конверсия углеводородных топлив сопровождается требующими внешнего подвода теплоты (+ΔH) эндотермическими реакциями парового риформинга (SR) и декомпозиции (D), а также экзотермической реакцией (-ΔH) конверсии водяного газа (WGS).

При паровой конверсии метанола уравнения реакций имеют вид [6]

$$CH_3OH \leftrightarrow 2H_2 + CO \quad \Delta H = 91 \text{ кДж/моль (D)};$$

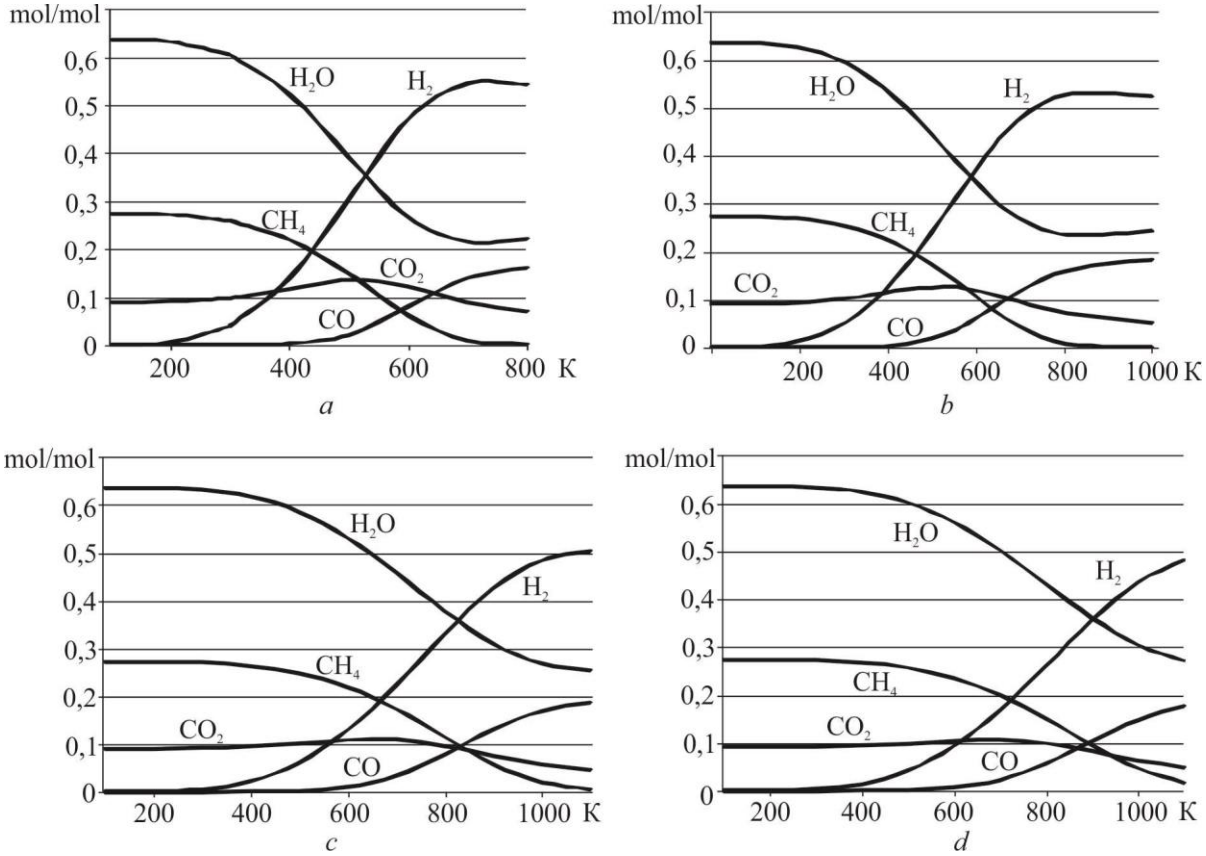
$$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2 \Delta H = -41 \text{ кДж/моль (WGS)};$$

$$CH_3OH + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 3H_2 \Delta H = 50 \text{ кДж/моль (SR)}.$$

Результаты моделирования процессов паровой конверсии метанола в реакторе на основе метода минимизации свободной энергии Гиббса представлены достаточно широко [6, 13–16]. Установлено, что в диапазоне температур 573…623 К происходит полная конверсия метанола. По мере дальнейшего повышения температуры выходы H_2 и CO снижаются. При увеличении отношения пар/метанол выше оптимального выход H_2 и CO также уменьшается. В работе [13] проведено сравнение результатов математического моделирования процессов реакторе с экспериментальными данными и предложено ввести корректирующие функции, учитывающие проведение неравновесного риформинга и влияние катализатора. Согласно рекомендациям [19] при паровой конверсии метанола максимальная энергетическая эффективность может быть достигнута в диапазоне температур реакции 570…580 К при отношении вода/метанол 1,3 (моль/моль) в условиях атмосферного давления.

Газообразное топливо подается в МОД под давлением 25…30 МПа, в СОД 0,5…0,6 МПа. Давление подачи топлива в ГТД 2..3 МПа, кроме регенеративных установок, где оно может быть ниже. С целью уточнения влияния давления процесса на эффективность конверсии проведено математическое моделирование процессов паровой конверсии метанола при повышенном давлении (рис. 2). Моделирование показывает, что рост давления приводит к смещению области эффективности в зону высоких температур. Это совпадает с результатами исследований других авторов [14].

Применение полученного в результате конверсии синтез-газа с высоким содержанием водорода в серийных судовых двухтопливных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) может вызывать некоторые трудности. Согласно документации ведущих производителей судовых ДВС, топлива с низким метановым числом (MN > 46,8) не рекомендованы к использованию в двухтопливных дизельных двигателях. Так для двухтопливных двигателей Wartsila мольное содержание водорода не должно превышать 30%, содержание метана в диапазоне 70–100%, CO не более 10% [20]. Это связано со значительным влиянием состава топлива на рабочий процесс двигателя. Изучение параметров с дальнейшей оптимизацией процессов в цилиндре ДВС при применении такого топлива требует дальнейшего детального рассмотрения и выходит за рамки данной статьи.



a – *p* = 0,1 МПа; *b* – *p* = 1,0 МПа, *c* – *p* = 5,0 МПа, *d* – *p* = 10,0 МПа

Рис. 2. Влияние давления и температуры процесса на компонентный состав продуктов паровой конверсии метанола.[4]

В тоже время производители газотурбинной техники декларируют возможность работы своей продукции на топливном газе с высоким содержанием водорода [21-23]. Согласно данным концерна Siemens, проведенные в 2012–2014 гг. [21, 22] и 2017 г. [24] испытания показали возможность устойчивой работы ГТД на синтез-газе с содержанием водорода 50…60%.

Как указывалось выше, эффективная паровая конверсия метанола не требует высокого температурного потенциала, так как характеризуется относительно низкой температурой реакции (570–620 К). Предыдущие исследования [7,8,25] выявили перспективность применения для такого базового топлива схемы ГТУ с размещенными последовательно за турбокомпрессорным блоком (ТК) регенератором (Р) и термохимическим реактором (ТХР). Обозначение схемы - ТК–Р–ТХР. Благодаря низкой степени повышения давления в ГТУ регенеративного цикла, влияние давления на эффективность конверсия метанола незначительно. Схема представляет собой контактный газотурбинный агрегат с совместной термодинамической и термохимической регенерацией. В данной схеме ГТУ парогазовая смесь после реактора, имеющая достаточно высокую температуру подается в камеру сгорания как в цикле STIG. Газопаровая смесь расширяется в турбине и проходит через рекуператор, подогревая цикловой воздух, термохимический реактор, отдавая тепло при эндотермических реакциях (D) и (SR) и далее, поступает в утилизационный парогенератор.

Исследование эффективности схемы выполнено применительно к регенеративному ГТД производства «Зоря»–«Машпроект» типа UGT3200R [26]. Двигатель предназначен для привода генератора и может использоваться в составе судовой энергетической установки с электродвижением. Степень термодинамической регенерации принята по прототипу и близкой к предельной возможной, так как дальнейшее увеличение сопровождается значительным ростом теплообменной поверхности. Температура газа перед турбиной также принята по прототипу.

В основу математической модели газотурбинного блока положен укрупненный расчет регенеративного ГТД [27] с учетом потерь полного давления во всех элементах газовоздушного тракта и отборов воздуха на охла-

[4] Appendix 1

ждение лопаток турбины. Для определения гидравлических сопротивлений проведено моделирования процессов в теплообменных аппаратах при заданных в расчетной схеме параметрах. Модель камеры сгорания основана на комбинированном химическом и фазовом равновесии, при этом для определения компонентного состава выполняется минимизация свободной энергии Гиббса для продуктов реакции [28,29]. Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора. Модель термохимического реактора выполнена двухкомпонентной и включает два последовательно установленных блока.

Моделирование проводилось для указанных в табл. 2 параметрах базового турбокомпрессорного блока при следующих ограничениях: - фиксированная мощность ГТД (3400 кВт); - фиксированная температура газа перед турбиной (T_3 = 1270 К); - параметры окружающей среды согласно ISO 19859:2016.

В качестве критерия эффективности принят коэффициент полезного действия установки

$$\eta = (Ne - N_{pump})/(C_N \cdot \mathrm{LCV})$$

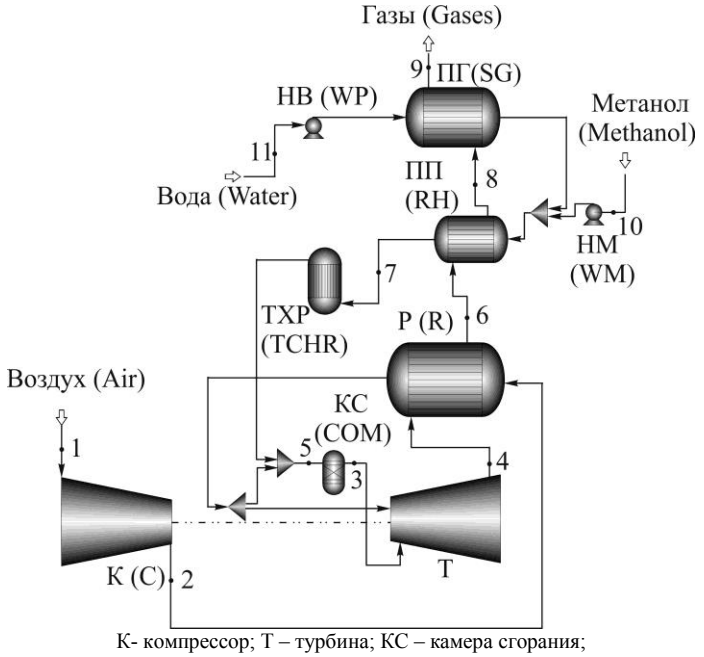
где Ne - механическая мощность на выходном валу газотурбинного двигателя, кВт; N_{pump} - затраты мощности на привод насосов подачи воды и метанола, кВт; C_N - секундный расход топлива, кг/с; LCV - низшая располагаемая теплотворная способность базового топлива, для метанола 19900 кДж/кг [4].

Таблица 2.[5]

Диапазон параметров базового регенеративного ГТД [16].[6]

Параметр (Parameter)	Значение Value
Количество компрессоров Number of compressors	1
Количество турбин (Number of turbines)	1
Мощность, (Power) MW	3,4
Расход воздуха, (Air mass flowrate) кг/с	16
Степень повышения давления (Pressure Increase)	7
Степень регенерации Degree of regeneration	0,85
Температура газа за регенератором, К (Gas temperature after the regenerator)	600

Упрощенная расчетная схема установки ТК–Р–ТХР представлена на рис. 3. Параметры рабочих сред в контрольных точках схемы представлены в табл. 3.



К- компрессор; Т – турбина; КС – камера сгорания;
ТХР – реактор; Р – регенератор; ПП – пароперегреватель; ПГ -парогенератор;
НВ- насос подачи воды; НМ – насос подачи метанола.

Рис. 3. Упрощенная расчетная схема регенеративной газотурбинной установки с термохимической конверсией метанола.[7]

[5,6,7] Appendix 1

Таблица 3.[8]

Параметры рабочих сред установки ТК–Р–ТХР при максимальном критерии эффективности.[9]

Точка контроля Point of control	Температура среды, К Temperature	Давление среды, Мпа Pressure	Массовый расход, кг/с Mass Flowrate
1	288	0,101	16
2	546	0,709	16
3	1251	0,672	12,17
4	787	0,114	17,09
5	753	0,702	12,17
6	604	0,109	17,09
7	584	1,000	1,09
8	588	0,105	17,09
9	451	0,101	17,09
10	288	0,101	0,40
11	288	0,101	0,69

Оптимизация цикла проводилась по указному критерию эффективности при варьировании следующих параметров:

- массовое отношение вода/метанол в диапазоне 0,2…1,0 (верхний предел диапазона ограничивался температурой газов за ГТД);
- температуры газа за регенератором в диапазоне 580…620 К (диапазон определялся минимальной эффективной температурой в термохимическом реакторе и заданной степенью регенерации).

Моделирование процессов в установке ТК–Р–ТХР показало, что рост КПД составил 4% по отношению к параметрам базового двигателя, работающего на метаноле. Выявлено, что оптимальное мольное отношение вода/метанол для данных параметров схемы ТК–Р–ТХР составляет 3 (рис. 4). Исследование позволило определить уровень ключевых температур цикла (рис. 5).

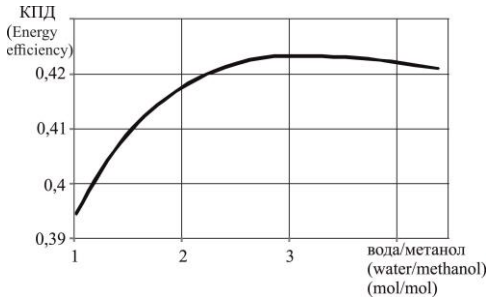


Рис. 4. Влияние мольного отношения вода/метанол на КПД установки ТК–Р–ТХР при фиксированных параметрах турбокомпрессора и мощности ГТД.[10]

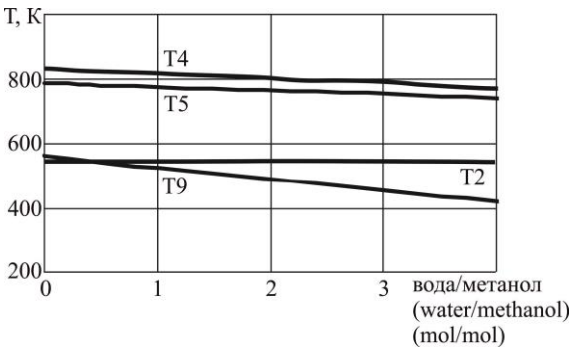


Рис. 5. Влияние мольного отношения вода/метанол на ключевые температуры регенеративного цикла при фиксированной мощности ГТД.[11]

Для определения влияния паровой конверсии метанола на образующийся при сжигании топлива CO_2 по методике [30] был проведен расчет содержанием углерода в полученном синтез-газе по сухим компонентам CH_4, CO_2, CO. Согласно полученным результатам, коэффициент содержания углерода в топливе составил 0,892 т CO_2/т метанола. В целом термохимическая регенерация сбросного тепла судовой газотурбинной установки с паровой конверсией метанола, как базового топлива позволило снизить EEDI в 1,54 раза.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить резервы повышения эффективности использования метанола, как топлива для тепловых двигателей судовых энергетических установок.

Определено влияние давления на температурный диапазон эффективной конверсии метанола и установлено, что параметры регенеративного газотурбинного двигателя соответствуют этому диапазону.

Моделирование процессов в контактной газотурбинной установке с совместной термодинамической и термохимической регенерацией, показало, что в условиях фиксированной мощности ГТД рост КПД составил 4% по отношению к параметрам базового двигателя, работающего на метаноле. При этом оптимальное мольное соотношение вода/метанол составляет 3.

Применение термохимических технологий позволило более чем в 1,5 раза снизить выбросы CO_2 при эксплуатации судовой энергетической установки на базе газотурбинного двигателя.

Представляет интерес дальнейшее исследование характеристик контактной газотур-

[8,9,10,11] Appendix 1

бинной установки с совместной термодинамической и термохимической регенерацией для перспективных температур газа перед турбиной при работе на топливах с низким содержанием углерода - метанол, этанол, LNG и LPG.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

[1,2] **Table 1.** Parameters of main marine fuels

[3]**Fig. 1.** Comparison of characteristics of HFO and alternative fuels

[4]**Fig. 2.** Influence of pressure and temperature on the component composition of steam methanol conversion (*a* – *p* = 0,1 MPa; *b* – *p* = 1,0 MPa, *c* – *p* = 5,0 MPa, *d* – *p* = 10,0 MPa)

[5,6]**Table 2.** Parameters of the base gas turbine engine

[7]**Fig. 3.** Simplified calculation scheme of a gas turbine plant with thermochemical methanol conversion (C– compressor; T- gas turbine; COM – combustor; TCHR - thermo-chemical reactor; R – regenerator; RH – reheater; SG - steam generator; WP -water pump; WM – methanol pump)

[8,9]**Table 3.** Parameters of working mediums of the gas turbine plant with thermochemical methanol reforming in maximum energy efficiency conditions

[10]**Fig. 4.** Influence of water/methanol ratio on the energy efficiency.

[11]**Fig. 5.** Influence of water/methanol ratio on main temperatures of the regeneration gas turbine cycle.

Литература (References)

[1] BP Energy Outlook: 2019 edition. Available at: (https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf (accessed 01.04.2019)

[2] UNCTAD/RMT/2017. Available at: https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf (accessed 01.04.2019)

[3] UNCTAD/RMT/2018. Available at: https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf (accessed 01.04.2019)

[4] IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. 2016. Available at: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/IMO-Train-the-Trainer-Course.aspx (accessed 01.04.2019)

[5] LNG Carriers with ME-GI Engine and – High Pressure Gas Supply System. MAN Diesel & Turbo. 5510-0026-04ppr Sep 2014. – Available at: https://marine.mandieselturbo.com/docs/libraries provider6/technical-papers/lng-carriers-with-high-pressure-gas-supply-system.pdf?sfvrsn=16 (accessed 01.04.2019).

[6] Poran A, Tartakovsky L. Energy efficiency of a direct injection internal combustion engine with high-pressure methanol steam reforming. *Energy*, 2015; Vol. 88, pp. 506-514.

[7] Cherednichenko O., Serbin S. Analysis of Efficiency of the Ship Propulsion System with Thermochemical Recuperation of Waste Heat. *Journal of Marine Science and Application*, 2018, Vol. 17, Issue 1, pp 122–130. doi: https://doi.org/10.1007/s11804-018-0012-x.

[8] Cherednichenko O. Analysis of efficiency of diesel-gas turbine power plant with thermo-chemical heat recovery. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 2015, Lublin-Rzeszow, vol.17, № 2, pp. 25–28

[9] Matveev I, Serbin S. Investigation of a reverse-vortex plasma assisted combustion system, *Proc. of the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conf.*, Puerto Rico, USA, HT2012-58037, pp. 133-140, 2012.

[10] Serbin S. Features of liquid-fuel plasma-chemical gasification for diesel engines, *IEEE Trans. Plasma Sci*., 2006, vol. 34, no. 6, pp. 2488-2496

[11] Serbin SI, Matveev IB, Goncharova MA. Plasma Assisted Reforming of Natural Gas for GTL. Part I, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2014, vol. 42, no. 12, pp. 3896-3900

[12] Cherednichenko O., Tkach M. Vliynie klimaticheskikh faktorov na efektivnost utilizatsionnoy metallogidridnoy ustanovki dvukhtoplivnogo malooborotnogo DVS gazovoza [Influence of Climatic Factors on the Efficiency of Disposal Metal-Hydride Unit for the Double-Fuel Low-Speed Internal Combustion Engine of Gas Tankers]. *Trudy NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI"*,2017, Vol. 10(1232), pp. 85–91. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.12. (In Russian).

[13] Tartakovsky L., Baibikov V., Veinblat M. Modeling Methanol Steam Reforming for Internal Combustion Engine. *Energy and Power*, 2014, Vol. 4(1A), pp. 50-56. doi: 10.5923/s.ep.201401.04

[14] Tartakovsky L., Sheintuch M. Fuel reforming in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, № 86, pp. 88-114.

[15] Tartakovsky L, Baibikov V, Veinblat M. Comparative performance analysis of SI engine fed by ethanol and methanol reforming products. *SAE Technical Paper*, 2013, paper 11. Doi: 10.4271/2013-01-2617.

[16] Poran A., Tartakovsky L. Performance and emissions of a direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. *International journal of hydrogen energy*, 2017, Vol. 42, pp. 15652-15668

[17] Pashchenko D. Thermochemical recovery of heat contained in flue gases by means of bioethanol conversion. Thermal Engineering, 2013, vol. 60(6), pp. 438-443.

[18] Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemicalwaste-heat recuperation. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42(22), pp. 14926-14935.

[19] Tartakovsky L., Baibikov V., Veinblat, M. Comparative performance analysis of SI engine fueled by ethanol and methanol reforming products. *SAE Technical Paper*, 2013, vol. 11, pp. 1-10. doi: 10.4271/2013-01-2617

[20] Wärtsilä Methane number calculator. Available at: https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/methane-number-calculator (accessed 01.04.2019).

[21] Jenny Larfeldt, Mats Andersson, Anders Larsson, Daniel Moell. Hydrogen Co-Firing in Siemens Low NO_X Industrial Gas Turbines. *POWER-GEN Europe in Cologne*, Germany, June 27 - 29, 2017, Available at: http://m.energy.siemens.com/US/pool/hq/energy-topics/technical-papers/gas%20turbines/pge_2017_paper_hydrogen-cofiring_igt_larfeldt_siemens.pdf (accessed 01.04.2019).

[22] Bancalari E., Chan P., Diakunchak I. S. Advanced Hydrogen Gas Turbine Development Program, *ASME Paper GT2007*, 2006, 27869. doi: 10.1115/GT2007-27869

[23] Masakazu Nose, Tomo Kawakami, Hidefumi Araki, Noriaki Senba, Satoshi Tanimura. Hydrogen-fired Gas Turbine Targeting Realization of CO_2-free Society. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*,2018, Vol. 55 No. 4, pp. 1-7.

[24] Jenny Larfeldt. *Applying simulation and additive manufacturing to the development of next generation of hydrogen combustion*. Available at: http://www.international-bc-online.org/wp-content/uploads/2018/04/2_-Hydrogen_cofiring_Larfeldt_13april2018.pdf. (accessed 01.04.2019)

[25] Cherednichenko A.K. Modelirovanie energokompleksov s termokhimicheskoi regeneratsiei tepla dlya sudov-gazovozov [Modeling of efficiency of ship power plants with thermochemical heat recovery for liquefied natural gas carriers], *Vestnik dvigatelestroenija - Herald of Aeroenginebuilding*, 2016, Vol. 2, pp. 36-41.

[26] Romanovsky GF, Serbin SI., Patlaychuk VM. Suchasni gazoturbinnye agregatu [Advanced gas turbine plants] , 2005, NUK. t. 1 , - 344 p.

[27] Romanovsky GF, Vashchilenko MV., Serbin SI. Teoretichni osnovy proectuvanny sudnovykh turbinnykh agregatov [Theoretical foundations of the design of ship gas turbine plants]. 2003, UDMTU, Mykolaiv, p. 304.

[28] ANSYS Chemkin Theory Manual 17.0, Reaction Design: San Diego, 2015. Available at: https://www.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf (accessed 01.04.2019).

[29] Gagliano A., Nocera F., Bruno M., Cardillo G. Development of an equilibrium-based model of gasification of biomass by Aspen Plus. *Energy Procedia 111*, 2017, vol. 10, pp. 1010 – 1019.

[30] API TR 2571. TECHNICAL REPORT. Carbon Content, Sampling, & Calculation. 2012.

Сведения об авторе.

Чередниченко Александр Константинович, кандидат технических наук, доцент. Докторант НУК им. адм. Макарова. Область научных интересов: исследование процессов в судовых энергетических установках.
E-mail: cherednicenko.alexandr65@gmail.com

Bibliometric Assessment of Research on Energy in the World, in the Eastern Europe and in the Republic of Moldova

Turcan Nelly[1,2], Cujba Rodica[1,3]
[1]Information Society Development Institute
[2]Moldova State University
[3]Technical University of Moldova
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. Society is becoming increasingly dependent on energy. It is a stimulating factor for economic growth and technological change, but also the most significant limiting factor. The analysis of research trends on energy is of great importance because it provides a picture of the development directions of the future. The goal of the paper is to evaluate the performance and tendencies of researches on energy in the World, Eastern Europe region and in the Republic of Moldova. This goal is achieved by using bibliometric methods. Bibliometrics has become standard method for measuring the impact of research, which is accepted as a valid way of ranking scientific performance and tendencies. The novelty of the work consists in the wider geographical and chronological coverage of the study in comparison with similar studies, as well as that the analysis was carried out based on data extracted from two international and one national databases: Scopus Elsevier, Web of Science Core Collection and National Bibliometric Instrument. It was revealed that on global, regional and national levels the number of papers on energy increases quicker than the total number of publications. There is also a growth of the share of publications on energy from total number of documents on global, regional and national levels. The contribution of the Eastern Europe in the global information flow on energy increases slowly but stable. Lower speed of increase of the contribution of the Republic of Moldova in the regional (EE) information flow on energy is detected.
***Keywords*:** research on energy, energetical sector, energy research trends, energy research productivity, bibliometric assessment, information flow on energy.
DOI: 10.5281/zenodo.2650736

Evaluarea bibliometrică a cercetărilor în domeniul energeticii în lume, în regiunea Europei de Est și în Republica Moldova

Țurcan N.[1,2], Cujba R.[1,3]
[1]Institutul de Dezvoltare a Societății Informaționale
[2]Universitatea de Stat din Moldova
[3]Universitatea Tehnică a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Societatea devine din ce în ce mai dependentă de energie, deoarece energia este atât un factor de stimulare a creșterii economice și al schimbărilor tehnologice, cât și cel mai important factor limitator. Analiza tendințelor cercetării în domeniul energeticii are o importanță deosebită, deoarece oferă o imagine a direcțiilor de dezvoltare pentru viitor. Scopul lucrării constă în evaluarea nivelului de dezvoltare și a tendințelor cercetării în domeniul energeticii în lume, în regiunea Europei de Est și în Republica Moldova. Acest scop este atins prin utilizarea metodelor bibliometrice. Bibliometria a devenit metodă standard pentru măsurarea impactului cercetării, care este acceptată ca o modalitate credibilă de evaluare a performanței științifice. Noutatea lucrării constă în acoperirea mai largă geografică și cronologică a cercetării în comparație cu alte lucrări similare, precum și în faptul că analiza a fost efectuată pe baza datelor extrase din două baze de date internaționale și una națională: Scopus Elsevier, Web of Science Core Collection și Instrumentul Bibliometric Național. S-a constatat că, la nivel global, regional și național, numărul de lucrări privind energetica crește mai rapid decât numărul total de publicații. Se înregistrează deasemenea o creștere a ponderii publicațiilor în domeniul energeticii din numărul total de documente la nivel global, regional și național. Contribuția Europei de Est în fluxul informational global în domeniul energeticii crește încet, dar stabil. S-a stabilit, că viteza de creștere a contribuției Republicii Moldova în fluxul informațional regional (EE) în domeniul energeticii este mai mica.
***Cuvinte-cheie*:** cercetarea în energetică, sectorul energetic, tendințele cercetării în energetică, productivitatea cercetării în energetică, evaluarea bibliometrică, fluxul informațional în energetică.

© Turcan N., Cujba R. 2019

Библиометрический анализ исследований в области энергетики в мире, в Восточной Европе и в Республике Молдова

Цуркан Н.В.[1,2], Кужба Р.В.[1,3]
[1]Институт развития информационного общества
[2]Молдавский государственный университет
[3]Технический университет Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Общество становится все более зависимым от энергии. Энергия является не только стимулирующим фактором экономического роста и технологических изменений, но также и сильнейшим ограничивающим фактором. Анализ тенденций исследований в области энергетики имеет большое значение, поскольку он дает представление о направлениях развития данной отрасли в будущем. Целью работы является оценка продуктивности и тенденций исследований в области энергетики в мире, регионе Восточной Европы и в Республике Молдова. Эта цель достигается с помощью библиометрических методов. Библиометрия стала стандартным методом измерения воздействия исследований, который принят в качестве надежного способа ранжирования научных достижений и тенденций. Новизна работы заключается в более широком географическом и хронологическом охвате исследования по сравнению с аналогичными работами, а также в том, что анализ проводился на основе данных, извлеченных из двух международных и одной национальной баз данных: Scopus Elsevier, Core of Science Core Collection и Национальный Библиометрический Инструмент. Выявлено, что на глобальном, региональном и национальном уровнях количество статей по энергетике увеличивается быстрее, чем общее количество публикаций. Растет, также, и доля публикаций по энергетике в общем количестве документов на глобальном, региональном и национальном уровнях. Вклад Восточной Европы в глобальный информационный поток по энергетике увеличивается медленно, но стабильно. Обнаружена более низкая скорость роста вклада Республики Молдова в региональный информационный поток в области энергетики.

***Ключевые слова*:** исследования в энергетике, тенденции исследований в области энергетики, производительность исследований в области энергетики, библиометрическая оценка, информационный поток.

INTRODUCTION

Energy is fundamental to the economic progress and social development of any country. Human society is increasingly dependent on energy, which is a stimulating factor for economic growth and technological change. Energy use is also a key determinant in ensuring the needs of various fields or branches, populations' needs, as well as increasing the quality of life. Driven by expansion in developing countries, global energy demand is set to increase by 35% over the period 2015–2040 [1]. Primary energy consumption growth averaged 2.2% in 2017, up from 1.2% in 2016 and the fastest since 2013. This compares with the 10-year average of 1.7% per year, contributing significantly to economic growth, as well as of living standards [2]. A number of authors that have investigated the relation between a country energy use and its degree of development have found strong correlations between energy use and living standards [3-6]. However, in the current context of globalization, the energy used by a country is not anymore an adequate indicator for measuring the total energy requirements associated with its level of development; the significant variable is the energy consumed worldwide to produce the goods and services required by that country [7].

There is a variety of interdisciplinary studies (i.e. chemistry, engineering, environmental science, materials science, economics etc.) that approach the issues of production, distribution and use of energy [8-9]. The analysis of energy research trends is of great importance because it provides a picture of the development directions of the future. At the same time, it is very important to analyse the energy situation in developing countries for sustainable development [10], as well as the contribution of the energy sector to achieve the sustainable development objectives (SDOs) [11]. Multidisciplinary research into economic, social, technical, behavioural, institutional, governance and policy aspects of energy market is of imminent importance, especially because policy-makers need valid and reliable information to support evidence-based decisions in the process of developing policies on energy issues [12].

In the Republic of Moldova (RM), the energy sector is the basic branch for the country's economy, and other segments of the national economy largely depend on it. The evolutions in the global economy, the global financial crisis, the energy impasse in which are the energy-

dependent countries, and the significant dependence of the Republic of Moldova on the import of energy resources, require the development of strategic mechanisms and levers to deal with country's dependence on the energy resources [13]. The dependence on imported energy resources determines a great vulnerability of the country's macroeconomic stability.

In order to develop the energy sector of the Republic of Moldova, it is necessary to implement a series of solutions, such as: increasing energy efficiency, introducing modern and efficient systems for energy consumption management, developing incentive mechanisms for actions to increase energy efficiency and energy conservation, creation of the biofuel use infrastructure, as well as participation of academia in R&D on energy [14].

In this context, it is important to identify the regional and national contribution to researches on energy. Typically, various indicators are used to measure the impact, the visibility or the performance of science, for example, the number of scientific publications, the number of citations, the number of downloads etc. These indicators cannot have a full impact, but they are often viewed as powerful and unequivocal forms of evidence [15] and can be used for evaluation of the science evolution [16, 17].

Although, there is not yet an accepted framework within which to measure societal impact of the research, bibliometrics has become standard methods for measuring the impact of research in science [18] which is accepted as a valid way of ranking scientific performance. The bibliometric analytical technique offers an effective quantitative perspective to assessing the development and growth of research on strategic topics [19]. It is a statistical method of counting to evaluate the growth of literature for a particular subject, which has been widely employed in various disciplines to describe the distribution pattern of articles within a given topic, field, institution and country [20].

There are some advantages in implementing bibliometric analysis that makes it suitable for the assessment of research: (1) it provides an evaluation of the scientific production in a specific research areas over a period of time using indicators for evaluation of research performance [21]; (2) it analyses data, which concerns the essence of scientific work; (3) the bibliometric data can be easily found and assessed for a broad spectrum of disciplines using appropriate databases [22]; (4) it examines science as a knowledge-generating system [23]; (5) the results of bibliometrics correlate well with other indicators of research quality [24]; (6) it is possible to summarize big amounts of information and establish key characteristics in the research landscape; (7) allows comparison among different scientific disciplines and different countries [25].

Many research areas, scientific disciplines and countries have tried to evaluate their evolution by this method and, nowadays, bibliometric techniques have become an important instrument for measuring scientific progress. The data provided by the bibliometric analyses on the productivity of scientific research help governments, decision-makers in the distribution of public money, in the elaboration of long-term strategic plans, to establish research perspectives directions, or decide to support certain research activities in accordance with the economic and political objectives of a country [26].

RELATED WORKS

For the last years, the evaluation of the productivity of scientific research become common practice in energy field. Several bibliometric analyses were carried out to evaluate global scientific production on R&D in the energy sector [27, 28]. The results showed that the United States, Japan, China and India are the countries that published most papers on energy subjects. The USA is the country that has published most of papers in energy field, including both individual production and international collaboration. Studies on energy technology, environmental aspects and global climate changes are among the main topics. Among leading countries, China has demonstrated a stupendous growth rate, specialization in the field, and immense scientific output.

A significant body of research has focused on bibliometric review of various energy related fields of research, such as low-carbon power [29, 30], solar power [31, 32], energy efficiency [33, 34], green energy [35], alternative energy [36] etc. The purpose of those studies was to provide an overview of research activities at the global level on these topics, describing various aspects of research outputs.

Bibliometric indicators have generally been used to evaluate country-wide energy publishing. For the last decade the evaluation of the productivity of scientific research in energy

fields become common practice in various countries: Australia [37], Brazil [38], China [20, 39-41], Germany [42], India [43-45], Norway [46], South Africa [25], Spain [47] etc.

The study regarding visualizing Australia energy and environment research productivity, conducted over the period of 1991-2014, shows a steady increase in Australia's literature output in energy fuels (8.4%). The results show that many of research papers have identified in the field of energy fuels 174 (6.2%) as the scientists are interesting to do their research [37].

The analysis of Brazilian research on high energy physics, indexed by Web of Science from 1983 to 2013 [38], show the increase of the international collaboration in the field under study. Brazilian high energy physics articles accounted for 3% of the total investigated. Brazil occupies the fourteenth position in terms of participation in high energy physics. Also, the results show that the average publications growth in this period in Brazil. In terms of visibility, significant internationalization of research in the field seems to have contributed to the high rate of articles with at least one citation (87.65%).

Bibliometric analysis of Chinese energy research aims to summarize an overview of Chinese research in energy R&D, and trends in research on coal, microbial fuel cells, energy and fuels using comprehensive bibliometric analysis measures based on data extracted from Web of Science databases [20, 39-41]. Thus, China has cooperated with 75 countries in the field of energy and fuels. The USA and Japan have had the highest rates of co-publication with China, much higher than other countries. Also, China showed an exponential increase in its number of published articles. Energy fuels, engineering chemical, environmental sciences were the major subject categories and biomass and biodiesel research was the popular topic, as well as hydrogen and fuel cells, but solar energy was not still „hot".

Another country's scientometric study on trends in solar energy research has been conducted in Germany [42]. The results of the study have shown that there are increasing trends of papers during the study period 2011-2015.

Over the past 5 years, several studies on the bibliometric and scientometric analysis of literature in various fields of energy in India have been conducted [43-45]. The papers attempt to study the trends in renewable energy, solar energy, green energy and wind energy research in India. Results demonstrate that India has shown increasing trend in the research output in these emerging areas of energy research. Thus, it is found that after the year 2000, PhD is produced in almost every renewable energy technology which is quite applauding. At the same time research output in solar energy in India almost doubled in 2005-2009 as compared to 2000-2004. Although, the research productivity of renewable energy reveals that a regular growth during the study period 2001-2013, India's contribution on renewable energy output during the study period is 652 only. This number is very low in comparison with other countries.

Social science studies actively contribute to public debate on reducing energy consumption and building effective and socially sustainable energy markets. The international and Norwegian study towards social science research on energy has identified key areas covered by this topic [46]. The energy subject area with the most publications is energy use, followed by carbon capture and storage and wind technology. The analysis indicates that energy, and environmentally friendly energy especially, has increased in importance within social science publishing and also in terms of Norwegian participation in national and international research projects. This heightened research interest reflects a hard focus on environmentally friendly energy, in an international and national context.

The objective of another investigation is to assess the field of energy research in the South Africa [25]. The Thomson Reuters databases were interrogated for the identification of South African authors publishing in the field of „Energy and Fuels" during the period 2003–2013. Analysis of the core energy literature identified that 752 articles with at least one South African address appeared in the database during this period. The South Africa's contribution to core energy literature is showing an increasing trend. However, the South African national research system is producing a relatively small number of research publications in the international energy core literature. Energy research literature constitutes approximately 1% of the national output. Analysis of the specialisation patterns of energy research shows that fossil (31.5%) and renewable energy (28.0%) related research are equally emphasised in the South Africa, albeit by a small number of articles, and topics related to energy efficiency appear to be an ascending trend.

In [47] it is presented the result of the bibliometric study regarding research on energy in Spain carried out using Scopus Elsevier database. The analysis shows the distribution of the 12,532 Spanish energy contributions in the period 1957–2012. Mainly, consisting of journal papers (70.66%) and conference papers (25.85%), other types of publications such as reviews and editorials have a less important weight. The increase in publications during this period has been exponential, especially in the Engineering, Material Science and Chemistry categories. As a result of the keywords analysis the authors have deduced that „Power Quality", „Hydrogen" and „Modelling" are the three terms most used by researchers. The studies show that the Spanish contribution is significant, that the energy topics produce a big amount of international publications in journals and outstanding conferences, also that Spain collaborates with a relevant number of international institutions.

Regarding the bibliometric and scientometric researches carried out in the Republic of Moldova, some analyses on scientific productivity [48, 49] and on the contribution of the Moldovan researchers in the information process [50, 51], as well as analysis of research outputs in some research areas [52] should be noted.

According to the analysis presented in these papers, there has been the unprecedented growth of contribution of Moldavian scientists on a world-wide information process after 2004. This process is related with new type of science administration due to enactment of „The Code on Science and Innovation" and intensification of international scientific cooperation. Also, articles present the data regarding the Moldovan scholars' collaboration in academic publishing in different scientific disciplines in the period from 2001 to 2010. In these papers is specified the contribution of researchers and scientific groups to the development of different directions of national science. It is demonstrated that Moldova is among the countries with the mid-level of both the scientific and socio-economic development.

The bibliometric studies carried out at the international level, as well as those in the Republic of Moldova, do not present analysis on the research output and trends in energy research in Eastern Europe[1] region (EE).

Against this background the objective assessment of scientific productivity on energy of the EE region in general and of the Republic of Moldova in particular acquires special importance. Thus, this study aims to provide an up-to-date bibliometric view and trends of energy R&D in EE region and in the Republic of Moldova.

OBJECTIVES OF THE STUDY

The main objective of this study is to evaluate the trends in research performance in the field of energy research in the world, Eastern Europe region and, as a case study, in the Republic of Moldova, for the period of 15 years (2003-2017).

Specific objectives of the paper are:

- To perform bibliometric analysis of research papers on energy with authors from all over the world, from the Eastern Europe countries and from the Republic of Moldova;
- To find out and compare the growth rate of the number of publications on energy on global, regional and national level;
- To compare the share of papers on energy form total number of publications on global, regional and national level;
- To identify and compare regional contribution in the worldwide and national contribution in the regional information flow on energy;
- To detect main trends in R&D on energy in the world, in the region and in the Republic of Moldova;
- To identify top researchers, top research organizations and top countries in research on energy on global, regional and national levels.

METHODOLOGY, RESULTS, DISCUSSIONS

METHODOLOGY

This study was performed based on data from three databases: 1) Web of Science (WoS – Core collection), 2) Scopus, 3) National Bibliometric Instrument (IBN) [53], and covers the period of 15 years (2003-2017). Data were gathered in the period of 16-20 February 2019.

[1] Eastern Europe countries according to Worldometers: Russia, Ukraine, Poland, Romania, Czech Republic, Hungary, Belarus, Bulgaria, Slovakia, Moldova http://www.worldometers.info/population/europe/eastern-europe/.

It should be noted that IBN was used to extract data only on national level.

The following data were extracted:

- Total number of papers, and publications on energy registered in databases;
- Total number of papers, and publications on energy with authors from EE region;
- Total number of papers, and publications on energy with authors from RM;
- Authors with the most papers on energy on global, regional (EE) and national (RM) levels;
- Affiliated organizations to authors with the most papers on energy from all over the world, EE region and RM;
- Most productive countries in research on energy on global and regional level;
- Countries with which the Republic of Moldova in research on energy collaborates.

Obtained data on publications were processed in order to identify:

- Growth rate of the total number of publications and of papers on energy on global level;
- Growth rate of the total number of publications and of papers on energy with authors from Eastern Europe;
- Growth rate of the total number of publications and of papers on energy with authors from the Republic of Moldova;
- Share of research papers on energy with authors from all countries of total number of publications;
- Share of papers on energy on regional level of total number of publications with authors from EE;
- Share of papers on energy on national level of total number of publications with authors from RM;
- Contribution of EE authors to world information flow on energy research;
- Contribution of RM authors to regional information flow on energy research;
- Global, regional and national trends in energy research;
- Five top authors and authors' affiliations of papers on energy in the World, in EE region and in RM;
- Five top more productive countries in research on energy on global and regional level;
- Five top countries with which academia from the Republic of Moldova in research on energy collaborates.

RESULTS

One of the main bibliometric indicators is the dynamics of the number of papers written by authors located in a given geographical area in a specific subject during a certain period. But this indicator cannot be used for comparison of dynamics on global, regional and national level. In this case the growth rate of the number of publications can be used, a certain year for all geographical areas being considered as 100% or 1.

According to data collected from Web of Science and Scopus the growth rate of research papers on energy is bigger than the growth rate of the total number of publications. Thus, on global level, in 15 years the number of papers on energy increased about 2 times, while the number of papers on energy in the same period has increased 4.7 times in WoS and 3.9 times in Scopus (tab. 1).

According to data presented in table 2, on EE level the total number of publications increased 2.9 times in WoS and 1.7 times in Scopus, while the number of papers on energy increased 6.5 times and 4 times correspondingly.

As about the Republic of Moldova, according to international sources the growth rate of the total number of publications is comparable with that of the world and global: 1.9 in WoS and 2.4 in Scopus. At the same time, the number of papers on energy with authors from the Republic of Moldova increased 12.3 times in WoS and 14 times in Scopus in 15 years (tab.3). Together, data obtained from national database (IBN) show that the growth rate of total number of publications with authors from RM (22.7) and papers on energy with Moldovan authors (21.0) increased considerably, but are very close.

The phenomenon of a bigger growth rate of papers on energy in comparison with the growth rate of the total number of papers can be related to the increasing interest in the world, region and especially in Moldova for solving the energy problem. Taking into consideration obtained data it can be concluded that although the growth rate increased so much, research on energy is a less priority on national level and more on international one.

The number of publications with at least one author from the Republic of Moldova reveals that there are about three times as many papers on a national level (according to IBN), as on international one (based on Web of Science and Scopus) (tab. 4).

Table 1.

Growth rate of total number of publications and papers on energy in 15 years on global level

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	Web of Science														
Total on global level	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	2.0	2.1	2.1
On energy on global level	1.0	0.9	0.9	1.1	1.3	1.5	1.8	1.9	2.1	2.6	3.2	3.5	3.7	4.1	4.7
	Scopus														
Total on global level	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.8	1.7	1.6	1.5	1.8	1.9	1.8	1.9	2.0
On energy on global level	1.0	1.0	1.2	1.2	2.2	2.2	2.5	2.0	2.0	1.7	1.6	2.7	2.9	3.3	3.9

Table 2.

Growth rate of total number of publications and papers on energy in 15 years with authors from EE

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	Web of Science														
Total of EE	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	2.0	2.6	2.8	2.9
On energy of EE	1.0	0.8	0.9	0.9	1.7	1.7	1.9	2.0	2.0	2.4	2.6	3.2	3.8	4.7	6.5
	Scopus														
Total of EE	1.0	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.3	1.4	1.7
On energy of EE	1.0	0.9	1.0	0.9	1.1	1.2	1.5	1.4	1.6	1.7	2.0	2.1	2.6	3.1	4.0

Table 3.

Growth rate of total number of publications and papers on energy in 15 years with authors from RM

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	Web of Science														
Total of RM	1.0	0.8	1.2	1.1	1.3	1.5	1.5	1.7	1.1	1.3	1.1	1.0	1.4	2.1	1.9
On energy of RM	1.0	0.3	0.5	0.5	1.3	1.0	4.0	3.3	1.5	1.0	1.3	4.3	2.8	8.5	14.0
	Scopus														
Total of RM	1.0	0.9	1.2	1.2	1.1	1.3	1.6	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8	2.5	2.9	2.4
On energy of RM	1.0	0.0	0.3	0.5	0.8	1.3	1.0	0.8	0.3	1.5	0.5	1.8	6.3	6.5	12.3
	IBN														
Total of RM	1.0	1.3	2.2	4.3	8.2	9.5	12.1	13.1	14.7	16.5	15.5	16.6	16.0	17.6	22.7
On energy of RM	1.0	0.5	22.5	4.5	6.0	9.0	15.5	11.5	15.5	38.5	11.0	10.0	22.5	43.5	21.0

It is obvious, because international requirements to research papers are more drastic. According to figure 1, a moderate growth is observed during all period, with three distinguished peaks, in 2005, 2012 and 2016, when International Conference „Energy of Moldova. Regional Aspects of Development" was organized by the Institute of Power Engineering. It should be emphasized, that in 2017 there are more papers on energy in the international databases than in the national one.

Another representative indicator that shows the performance of researchers in a specific field

is the share of papers in this area in the total number of publications.

Based on data from two international sources that are presented in table 5 and figure 2, the share of papers on energy on global level increased slightly during 15 years: from 1% to 2.1% in Web of Science and from 2.2% to 4.4% in Scopus.

At regional level this share also increased slightly in 15 years: from 0.9% to 2.0% in WoS and from 2.8% to 4.7% in Scopus.

The share of papers on energy with authors from Moldova in two international sources increased significantly: from 1.6% to 8.1% in WoS and from 1.4% to 10.5% in Scopus. Significant growth can be seen after 2014. This phenomenon can be related to the increasing interest for research on energy of the Republic of Moldova on international level. Also, it can be a result of intensifying collaboration of researchers on energy from the Republic of Moldova with academia from other countries due to two facts: 1) visa-free regime for Moldova's citizens that has entered into force in 2014 and thus the exclusion of many previous bureaucratic procedures related with participation in international conferences, 2) the association in 2014 of the Republic of Moldova to the Seventh Research Framework Programme.

At the same time, according to national database (IBN), the share of papers on energy with authors from the Republic of Moldova did not increased (tab.5, fig.2). Only in 2005 there is a share of 7.7%. This 2005th pick appears due to the fact that the total number of papers published in this year and registered in IBN is comparatively smaller.

Another important bibliometric indicator is the contribution in information flow of a specific geographical area. In this context, a key research question is the identification of the contribution of the EE region in the global information flow on energy and of the Republic of Moldova in the regional information flow on energy research. These data are presented in table 6, figure 3.

Table 4.

Research papers on power engineering with authors from the Republic of Moldova

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	total
IBN	2	1	45	9	12	18	31	23	31	77	22	20	45	87	42	465
WoS	4	0	1	2	3	5	4	3	1	6	2	7	25	26	49	138
Scopus	4	1	2	2	5	4	16	13	6	4	5	17	11	34	56	180

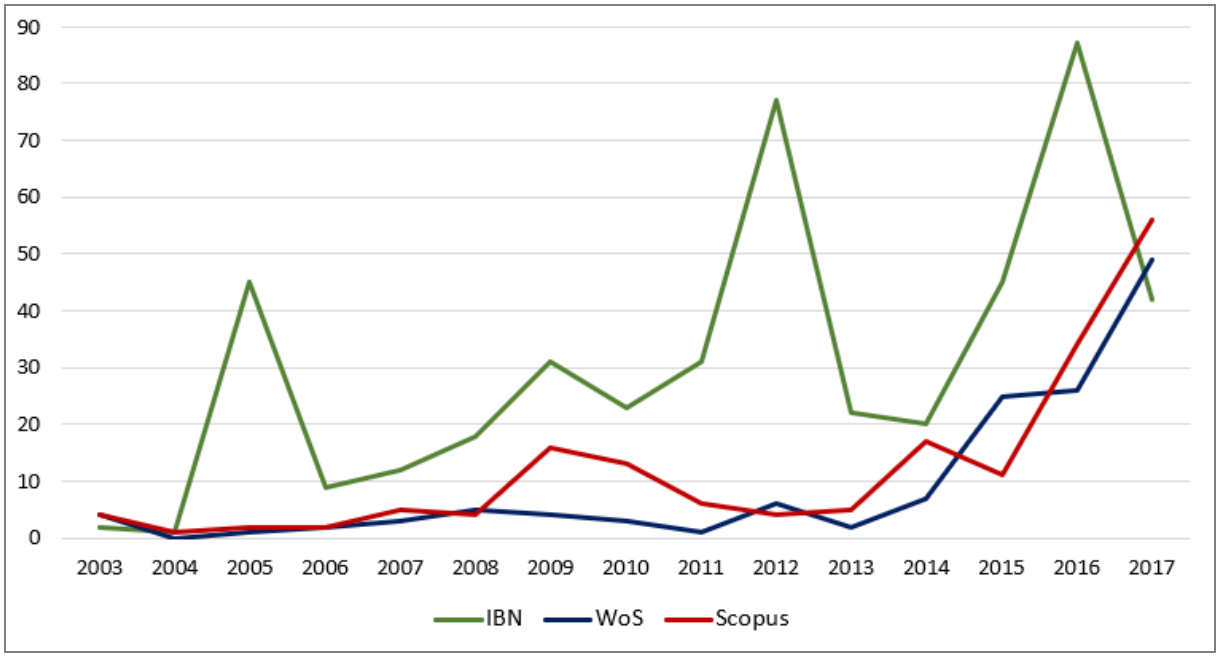


Figure 1. Number of research papers on energy with at least one Moldovan author.

Table 5.

Share of papers on energy from total number of papers (%)

Year	All countries		EE		RM		
	WoS	Scopus	WoS	Scopus	WoS	Scopus	IBN
2003	1.0	2.2	0.9	2.8	1.6	1.4	0.8
2004	0.9	2.2	0.7	2.2	0.0	0.4	0.3
2005	0.8	2.3	0.7	2.5	0.3	0.6	7.7
2006	0.9	2.2	0.6	2.2	0.7	0.7	0.8
2007	1.0	3.6	1.2	2.6	1.1	1.3	0.6
2008	1.1	3.4	1.1	2.6	1.5	0.9	0.7
2009	1.2	3.2	1.1	3.1	1.0	3.8	1.0
2010	1.2	2.7	1.1	2.8	0.9	2.7	0.7
2011	1.3	2.8	1.1	2.9	0.3	1.9	0.8
2012	1.5	2.6	1.2	2.9	1.5	1.1	1.8
2013	1.8	1.9	1.2	3.1	0.5	1.6	0.5
2014	1.9	3.3	1.4	3.0	1.6	5.8	0.5
2015	1.8	3.5	1.3	3.5	4.1	2.7	1.1
2016	1.9	3.9	1.5	3.8	3.6	5.7	1.9
2017	2.1	4.4	2.0	4.7	8.1	10.5	0.7

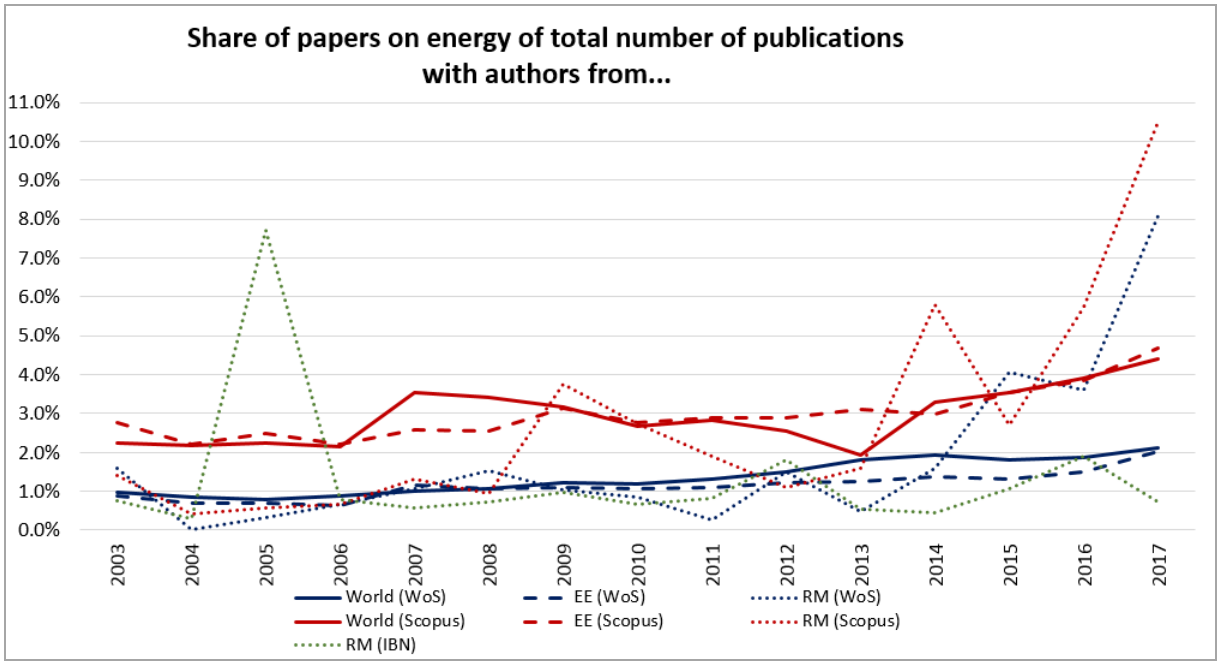


Figure 2. The share of research papers on energy.

Thus, the contribution of regional research on energy in the global one increased slightly in 15 years, with some ups and downs, from 4.2% to 5.9% in WoS and from 6.9% to 7.2% in Scopus.

The contribution of the Republic of Moldova in the regional information flow on energy increased in 15 years by only 0.6% in Web of Science and by only 0.4% in Scopus. So, the regional contribution in global information flow on energy research is higher than of the Republic of Moldova in the regional one.

One more bibliometric indicator is the identification of top authors, organizations and countries of papers in a certain domain. According to data obtained from databases and presented in table 7, on global level 5 top authors of papers on energy in Scopus is represented mostly by United States, while in WoS by China.

Table 6.

Contribution of the Eastern Europe and the Republic of Moldova in information flow on energy (%)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
of EE in the global (WoS)	4.2	3.8	4.0	3.4	5.5	4.9	4.6	4.5	4.1	3.9	3.4	3.8	4.3	4.9	5.9
of EE in the global (Scopus)	6.9	5.6	5.8	5.8	5.0	3.6	3.7	4.3	4.9	5.5	6.8	8.6	5.2	6.2	7.2
of RM in EE (WoS)	0.7	0.0	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.1	0.4	0.1	0.4	1.1	0.9	1.3
of RM in EE (Scopus)	0.2	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.5	0.6

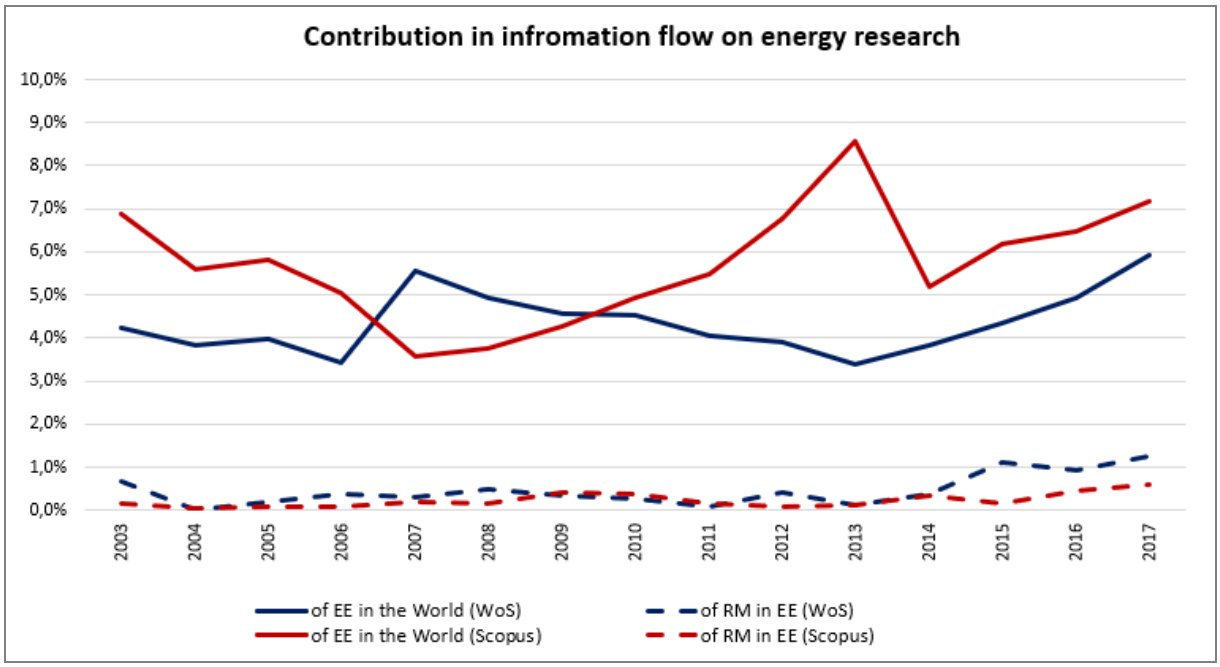


Figure 3. The contribution of EE region in the global and of the Republic of Moldova in the regional information flow on energy research.

At the same time, the number of publications of the 5 top authors in WoS is 3 times greater than in Scopus. Snow N. from United States is in the 5 top authors of papers on energy in both international databases.

On regional level, in five top authors Russian contribution is more visible: about 300 publications in Scopus and about 250 in WoS. Five top authors is also represented by Czech authors, with almost 250 publications in Scopus and almost 90 in WoS. It should be mentioned Khadziev S.N. from Russia, which is in top of both international databases (tab. 8).

Table 7.

Five top authors of papers on energy on global level, regional and national level

Top	Scopus	No of papers	WoS	No of papers
1	Jackson, K.M., USA	738	Snow N, USA	2568
2	Thinnes, B., USA	707	Wang Y, China	2312
3	Snow, N, USA	694	Zhang Y, China	1924
4	Dincer, I, Canada	601	Li Y, China	1832
5	Blaabjerg, F, Denmark	568	Li J, China	1636

Table 8.

Five top authors of papers on energy on regional level

Top	Scopus	No of papers	WoS	No of papers
1	Makrlík, E., Czech Rep.	125	Khadzhiev SN, Russia	103
2	Vaňura, P., Czech Rep.	124	Misak S, Czech Rep.	87
3	Khisamov, R.S., Russia	119	Korobeinichev OP, Russia	79
4	Khadzhiev, S.N., Lapidus, A.L., Russia	106	Fedorov AV, Russia	73
5	Strizhak, P.A., Russia	93	Badescu V, Romania	69

Table 9.

Five top authors of papers on national level

Top	Scopus	No of papers	WoS	No of papers	IBN	No of papers
1	Oleschuk, V.	27	Berzan V	16	Postolati Vitali	31
2	Penin, A.	15	Oleschuk V	15	Bîcova Elena	29
3	Ermuratskii, V.	10	Postolaty V	11	Berzan Vladimir	25
4	Palii, A.	9	Suslov V, Sit ML	8	Tîrşu Mihai	24
5	Arushanov, E., Berzan, V., Klokishner, S.	8	Ermuratskii V, Tirsu M.	7	Popescu Victor	21

The 5 top Moldovan authors of papers on energy, show that Berzan V. appears in the top of all 3 databases. Other 4 authors appear in two databases: Ermuratsky V., Oleschuk, V. Postolati V. and Tirsu M. (tab. 9).

The five top authors' affiliations of papers on energy on global level are represented exclusively by Chinese institutions in Scopus and by two of them (Chinese Academy of Sciences and Tsinghua University) in WoS. It is surprising to see an Indian organisation in this top (tab. 10).

On regional level, the 5 top authors' affiliations of papers on energy in both international databases are represented mostly by Russia (tab. 11). Accordingly, the first place in both databases is occupied by the Russian Academy of Sciences, but also the top is represented by one Ukrainian and one Romanian institutions in Scopus and by two Czech and one Romanian organization in WoS. In both cases Romanian organisation is represented by Polytechnic University of Bucharest.

The 5 top Moldovan institutions in research on energy is presented in table 12. These data denote that 4 organizations appear both in national and international databases: Institute of Power Engineering, Technical University of Moldova, Institute of Applied Physics, Moldova State University. State Agrarian University of Moldova.

Table 10.

Five top authors' affiliations of publications on energy on global level

Top	Scopus	No	WoS	No
1	Chinese Academy of Sciences	22015	Chinese Academy of Sciences	12753
2	Ministry of Education of China	15497	United States Department of Energy	11077
3	Tsinghua University, China	13098	Centre National De La Recherche Scientifique, France	6231
4	Xi'an Jiaotong University	8001	Indian Institute of Technology System IIT System	6122
5	China University of Petroleum - Beijing	7664	Tsinghua University, China	5231

Table 11.

Five top authors' affiliations of publications on energy on EE level

Top	Scopus	No	WoS	No
1	Russian Academy of Sciences	4308	Russian Academy of Sciences	3469
2	Siberian Branch, Russian Academy of Sciences	2081	VSB – Technical University of Ostrava, Czech Rep.	777
3	National Research Centre Kurchatov Institute, Russia	1251	Polytechnic University of Bucharest, Romania	653
4	National Science Center Kharkov, Institute of Physics and Technology, Ukraine	1237	Brno University of Technology, Czech Rep.	605
5	Polytechnic University of Bucharest, Romania	1143	Tomsk Polytechnic University, Russia	603

Table 12.

Five top authors' affiliations of publications on energy on national level (Republic of Moldova)

Top	Scopus	No	WoS	No	IBN	No
1	Institute of Power Engineering	50	Institute of Power Engineering	69	Institute of Power Engineering	129
2	Technical University of Moldova	32	Technical University of Moldova	22	Technical University of Moldova	92
3	Institute of Applied Physics	23	Institute of Applied Physics; Moldova State University	9	State Agrarian University of Moldova	52
4	Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies	14	Informinstrument S.A.; State Agrarian University of Moldova	3	Moldova State University	42
5	Moldova State University	9	National Agency on Energy Regulation	2	Institute of Applied Physics; Free International University of Moldova	19

As about contribution of countries in research on energy, on global level the same 5 countries entered the top in both international databases: China, USA, Japan, Germany, India (tab. 13). Even though, the number of publications on energy by five top countries in Scopus is about 2.5-3 times greater than in Web of Science.

On regional level again, the same 5 states represent the top countries in both databases: Russia, Poland, Ukraine, Czech Republic and Romania, and, again, the number of publications on energy per country is greater in Scopus than in Web of Science (tab. 14).

Table 13.

Five top countries with papers on energy on global level

Top	Scopus	Docs	WoS	Docs
1	China	250153	China	110128
2	USA	204755	USA	77516
3	Japan	57954	India	22970
4	Germany	51954	Germany	22442
5	India	50383	Japan	20303

Table 14.

Five top countries with papers on energy on EE level

Top	Scopus	Docs	WoS	Docs
1	Russia	30847	Russia	8029
2	Poland	10187	Poland	4974
3	Ukraine	6258	Czech Rep.	3176
4	Czech Republic	6106	Romania	2528
5	Romania	4894	Slovakia; Ukraine	963

In the era of science globalization, international co-authoring represents an important indicator. Thus, data on international co-authoring of papers on energy registered in Scopus and Web of Science reveal that Moldovan researchers collaborate more actively with their colleagues from Romania, United States, Germany, Italy, Russia, Spain, France, Estonia. Unfortunately, there is weaker international collaboration within national publishing. As a rule, papers in national repository are co-authored internationally by researchers from Moldova's neighbours: Romania, Ukraine, Russia (tab. 15).

Table 15.

Five top countries with which collaborate academia from the Republic of Moldova

Top	Scopus	Docs	WoS	Docs	IBN	Docs
1	Germany	19	Romania	16	Romania	7
2	Romania; USA	16	USA	13	Ukraine; Russia	4
3	Italy	13	Italy	9	United Kingdom	2
4	Spain	12	Germany	6	France; Israel	1
5	France; Russia	9	Estonia; Russia	4		

DISCUSSIONS

The results of the study presented in this work show that according to international databases on global, regional and national levels the number of publications on energy increases quicker than the total number of publications. This is due to the growing interest in the issue of energy. Based on national source, the growth rate of the total number of publications and papers on energy with authors from Moldova is almost the same. Hence, research on energy on national level is not a priority.

The analysis of the number of papers on energy with authors from Moldova obtained from international databases shows that Moldovan research on energy is at its initial stage of development, but the growth in the last years of the number of papers on energy inspire an optimism.

The dynamics of the share of papers on energy from total number of documents based on international sources denote that there is a slight but sure growth of this share on global and regional level.

At the same time, the dynamics of the share of papers on energy from total number of documents with authors from Moldova indicates that after 2014 this share have begun to grow more rapidly.

The contribution of the Eastern Europe in the global information flow on energy shows that it increases slowly but stable. Lower speed of increase of the contribution of the Republic of Moldova in the regional (EE) information flow on energy is detected.

The five top authors on global level show that research on energy in Scopus is more represented by USA researchers, while in WOS Chinese scholars are more visible.

On regional level most visible in research on energy are Russian and Czech scholars.

As for the Republic of Moldova, a pleasant surprise is that 5 top authors in research on energy are present in two or even in all databases.

On global institutional level Chinese organizations are the most visible in research on energy, while on regional level Russian affiliations are the most representative in Scopus but share the top in WoS with Czech organizations.

On national level more competitive in research on energy are Institute of Power Engineering, Technical University of

Moldova, Institute of Applied Physics and Moldova State University that are present in five top institutions of all three databases.

The contribution of countries in research on energy denote that on global level the same five states represent the top of two international sources: China, USA, Japan, Germany and India.

On regional level again, the same 5 states represent the top countries in both international databases: Russia, Poland, Ukraine, Czech Republic and Romania.

In international co-authoring Moldovan researchers collaborate actively with their colleagues from Romania, United States, Germany, Italy, Russia, Spain, France, and Estonia. There is weaker international collaboration within national publishing. Papers in national repository are oftener co-authored internationally by researchers from Moldova's neighbours: Romania, Ukraine, and Russia.

The final conclusion of the study is that as result of the high interest for solving energy problems, the number of papers on energy encreases on all levels. On global level the bigest contributors in research on energy are China, USA, Japan, Germany and India, while on regional level there should be mentened Russia and Czech Republic.

ACKNOWLEGMENTS

The study was performed due to the support of the research project 15.817.06.13A "The pilot platform for quality assurance and visualization of digital scientific content in the Republic of Moldova (SCIFORM)" (2015-2019).

REFERENCES

[1] Organization of the Petroleum Exporting Countries. 2017 OPEC World Oil Outlook. October 2017. Available at: https://woo.opec.org/ (accessed 19.07.2018)

[2] BP Statistical Review of World Energy 2108. 67th edition. 2018, June. Available at: https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf (accessed 19.07.2018)

[3] Lambert Jessica G., Hall Charles A.S., Balogh Stephen, Gupta Ajay, Arnold Michelle. Energy, EROI and quality of life. Energy Policy, 2014, vol. 64, pp. 153–167. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.001

[4] Liua Li, Chena Tie, Yin Yanhong. Energy Consumption and Quality of Life: Energy Efficiency Index. Energy Procedia, 2016, vol. 88, pp. 224-229. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.152

[5] Nadimi Reza, Tokimatsu Koji, Yoshikawa Kunio. Sustainable energy policy options in the presence of quality of life, poverty, and CO2 emission. Energy Procedia, 2017, vol. 142, pp. 2959-2964. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.314

[6] Pasten Cesar, Santamarina Juan Carlos. Energy and quality of life. Energy Policy, 2012, vol. 49 pp. 468-476. doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.051

[7] Arto Iṅaki, Capellán-Pérez Iṅigo, Lago Rosa, Bueno Gorka, Bermejo Roberto. The energy requirements of a developed world, Energy for Sustainable Development, 2016, vol. 33, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.esd.2016.04.001

[8] Abate Salvatore, Centi Gabriele, Lanzafame Paola, Perathoner Siglinda. The energy-chemistry nexus: A vision of the future from sustainability perspective. Journal of Energy Chemistry, 2015, vol. 24, no. 5, pp. 535-547. doi: 10.1016/j.jechem.2015.08.005

[9] Yao Lixia, Shi Xunpeng, Andrews-Speed Philip. Conceptualization of energy security in resource-poor economies: The role of the nature of economy. Energy Policy, 2018, vol. 114, pp. 394-402. doi: 10.1016/j.enpol.2017.12.029

[10] Kaygusuz Kamil. Energy for sustainable development: A case of developing countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 1116-1126. doi: 10.1016/j.rser.2011.11.013

[11] Urmee Tania, Md Anisuzzaman. Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries. Renewable Energy, 2016, vol. 93, pp. 159-167. doi: 10.1016/j.renene.2016.02.040

[12] Hoppe Thomas, Coenen Frans, Van den Berg Maya. Illustrating the use of concepts from the discipline of policy studies in energy research: An explorative literature review. Energy Research & Social Science, 2016, vol. 21, pp. 12-32. doi: 10.1016/j.erss.2016.06.006

[13] Baltag Alexandru, Baltag Dorina. Securitatea energetică a Republicii Moldova: alternative viabile. Politici Publice, 2009, no. 3, pp. 3-55. Available at: http://www.viitorul.org/ro/content/securitatea-energeticC483-republicii-moldova-alternative-viabile (accessed 19.07.2018)

[14] Canțer Valeriu. Sectorul energetic al Republicii Moldova. Akademos, 2009, no. 1(12), pp. 49-51.

[15] Penfield Teresa, Baker Matthew J., Scoble Rosa,. Wykes Michael C. Assessment, evaluations, and definitions of research impact: A review. Research Evaluation, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 21-32. doi: 10.1093/reseval/rvt021

[16] Nalimov V. V., Mul'chenko Z. M. Naukometriya. Izuchenie nauki kak informatsionnogo protsessa [Scientometrics. The study of science as an information process.]. Moscow: Nauka, 1969.

[17] Scharnhorst Andrea, Garfield Eugene. Tracing Scientific Influence. Dynamics of Socio-Economic Systems, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 1-33. Available at: http://garfield.library.upenn.edu/papers/tracingscientificinfluence2010.pdf (accessed 19.07.2018)
[18] Bornmann Lutz. Do altmetrics point to the broader impact of research? An overview of benefits and disadvantages of altmetrics. Journal of Informetrics, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 895-903. doi: 10.1016/j.joi.2014.09.005.
[19] Dua Huibin, Lia Na, Brown Marilyn A., Pengd Yuenuan, Shua Yong. A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field. Renewable Energy, 2014, vol. 66, pp. 696-706. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.018
[20] Peng Beihua, Guo Danning, Qiao Han, Yang Qing, Zhang Bo, Hayat Tasawar, Alsaedi Ahmed, Ahmad Bashir. Bibliometric and visualized analysis of China's coal research 2000-2015. Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 197, part 1, pp. 1177-1189. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.283
[21] Garfield E. Is citation analysis a legitimate evaluation tool? Scientometrics, 1979, vol. 1, no. 4, pp 359-375. doi: 10.1007/BF02019306
[22] Bornmann Lutz, Leydesdorff Loet. Scientometrics in a changing research landscape: Bibliometrics has become an integral part of research quality evaluation and has been changing the practice of research. EMBO Rep. 2014, vol. 15, no. 12, pp. 1228–1232. doi: 10.15252/embr.201439608
[23] Van R. For your citations only? Hot topics in bibliometric analysis. Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 50-62. doi: 10.1207/s15366359mea0301_7
[24] Diekmann A, Naf M, Schubiger M. The impact of (Thyssen)-awarded articles in the scientific community. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 2012, vol. 64, no. 3, pp. 563–581.
[25] Pouris Anastassios. A bibliometric assessment of energy research in South Africa. South African Journal of Science, 2016, vol. 112, no 11/12, pp. 1-8. doi: 10.17159/sajs.2016/20160054
[26] Matcharashvili Teimuraz, Tsveraidze Zurab, Sborshchikovi Aleksandre, Matcharashvili Tamar. Bibliometric indicators for the analysis of research performance in Georgia. Trames: Journal of the Humanities and Social Sciences, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 345–356. doi: 10.3176/tr.2014.4.03
[27] Araújo D. F. A., Costa A. P. C. S. Bibliometric analysis of R&D in the energy sector. IEEE Latin America Transactions, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 1221-1226. doi: 10.1109/TLA.2016.7459602
[28] Archambault, Éric Caruso Julie, Côté Grégoire, Larivičre Vincent Bibliometric analysis of leading countries in energy research, 2009. Available at: www.science-metrix.com/pdf/ISSI_2009_Archambault_et_al_Energy_RD.pdf (accessed 19.07.2018)
[29] Wang Lu, Wei Yi-Ming, Marilyn A. Brown. Global transition to low-carbon electricity: A bibliometric analysis. Applied Energy, 2017, vol. 2015, pp. 57-68. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.107
[30] Yu, Hao Wei Yi-Ming, Tang Bao-Jun, Mi Zhifu, Pan Su-Yan. Assessment on the research trend of low-carbon energy technology investment: A bibliometric analysis. Applied Energy, 2016, vol. 184, pp. 960-970. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.129
[31] De Paulo Alex Fabianne, Porto Geciane Silveira. Solar energy technologies and open innovation: A study based on bibliometric and social network analysis. Energy Policy, 2017, vol. 108, pp. 228-238. doi: 10.1016/j.enpol.2017.06.007
[32] Dong Bensi, Xu Guoqiang, Luo Xiang, Cai Yi, Gao Wei. A bibliometric analysis of solar power research from 1991 to 2010. Scientometrics, 2012, vol. 93, no. 3, pp. 1101–1117. doi: 10.1007/s11192-012-0730-9
[33] Du, Huibin Wei Linxue, Brown Marilyn A., Wang Yangyang, Shi Zheng. A bibliometric analysis of recent energy efficiency literatures: an expanding and shifting focus. Energy Efficiency, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 177–190. doi: 10.1007/s12053-012-9171-9
[34] Cristino Talita Mariane, Neto Antonio Faria, Costa Antonio Fernando Branco. Energy efficiency in buildings: analysis of scientific literature and identification of data analysis techniques from a bibliometric study. Scientometrics, 2018, vol. 114, no. 3, pp. 1275–1326. doi: 10.1007/s11192-017-2615-4
[35] Arenas A. D., Valencia G. E., Duarte J. E. Bibliometric analysis of green energy research from 2011 to 2017. Indian Journal of Science and Technology, 2018, vol. 11, no. 18. doi: 10.17485/ijst/2018/v11i18/122604
[36] Mao Guozhu, Liu Xi, Du Huibin, Zuo Jian, Wang Linyuan. Way forward for alternative energy research: A bibliometric analysis during 1994–2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 48, pp. 276–86. doi: doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.094
[37] Velmurugan C., Radhakrishnan N. Visualizing Energy and Environment Research Productivity in Australia: A Scientometric Profile. Asia Pacific Journal of Energy and Environment, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 145-160. Available at: https://journals.abc.us.org/index.php/apjee/article/view/738/610 (accessed 25.07.2018).
[38] Alvarez Gonzalo R., Vanz Samile A.S., Barbosa Marcia C. Scientometric indicators for Brazilian research on High Energy Physics, 1983-2013. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 2017, vol. 89, no. 3, pp. 2525-2543. doi: 10.1590/0001-3765201720160620.
[39] Liping Duan. Analysis of the relationship between international cooperation and scientific publications in energy R&D in China. Applied Energy, 2011, vol. 88, no. 12, pp. 4229-4238. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.045.

[40] Sanz-Casado Elías, Serrano-López Antonio, De Filippo Daniela, Lascurain-Sánchez María Luisa. Bibliometric analysis of Chinese-Spanish collaboration in renewable energy research. Project: Scientometric studies over sustainable energies, January 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293440323_Bibliometric_analysis_of_Chinese-Spanish_collaboration_in_renewable_energy_research (accessed 25.07.2018).
[41] Chen Hua-Qi, Wang Xiuping, He Li, Chen Ping, Wand Yuehua, Yang Lingyun, Jiang Shuian. Chinese energy and fuels research priorities and trend: A bibliometric analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 58, pp. 966-975. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.239.
[42] Rangasamy V., Umadev L. N. Scientometric Analysis of Solar Energy Research Publications in Germany. Journal of Advances in Library and Information Science, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 7-11. Available at: http://jalis.in/pdf/6-1/Ranga.pdf (accessed 25.07.2018).
[43] Goel Malti, Maurya Vandana, Desai Pranav N. R & D indicators and mapping of solar energy research output in India. Journal of Scientometric Research, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 52-58. doi: 10.4103/2320-0057.115889.
[44] Sivasekaran K. India's Contribution on Renewable Energy Research Output: A Scientometric Study. Journal of Advances in Library and Information Science, 2015, vol. 4, no.4, pp. 311-316. Available at: www.jalis.in/pdf/4-4/Siva.pdf (accessed 25.07.2018).
[45] Kumar Vipin, Sapna Arora Narula. Social Networking Analysis of Renewable Energy Research in India. Journal of Scientometric Research, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 102-108. doi: 10.5530/jscires.6.2.15.
[46] Klitkou Antje, Pedersen Trond Einar, Schwach Vera, Scordato Lisa. Social science research on energy: International and Norwegian studies: Rapport 4/2010. Oslo, 2010. Available at: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/279095/NIFUrapport2010-4.pdf?sequence=1 (accessed 25.07.2018).
[47] Montoya Francisco G., Montoya Maria G., Gómez Julio, Manzano-Agugliaro Francisco, Alameda-Hernández Enrique. The research on energy in Spain: A scientometric approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 29, pp. 173-183. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.094
[48] Turcan Nelly. Estimarea productivităţii ştiinţifice a savanţilor din Republica Moldova. Studia Universitatis. Seria Ştiinţe Sociale, 2011, nr. 8 (48), pp. 206-212. Available at: http://studiamsu.eu/wp-content/uploads/27.-p.206-212.pdf (accessed 25.07.2018).
[49] Turcan Nelly. Evaluarea statistică a publicaţiilor ştiinţifice ale Moldovei în revistele ISI. Itellectus, 2011, nr. 3, pp. 72-76. Available at: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/15134 (accessed 25.07.2018).
[50] Dicusar A.I. Mesto issledovatelej Moldovy v mirovom informatsionnom protcesse: Naykometricheskij analiz. [The place of Moldovan researchers in the world innovation process. The scientometric analysis]. Akademos, 2011, nr. 2(21), pp. 28-35. Available at: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/30878 (accessed 25.07.2018).
[51] Dicusar A.I., Kravtsov V.H. Dinamika uchastiya moldavskih issledovatelej v mirovom informatsionnom protsesse: Naykometricheskij analiz. [Evolution of involvement of Moldavian scientists on a world-wide information process: Scientometric analysis]. Akademos, 2010, nr. 1(16), pp. 11-16. Available at: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/2040 (accessed 25.07.2018).
[52] Dicusar A.I. Naykometricheskij analiz biologicheskih issledovanij v Moldove. Studia Universitatis. Seria Ştiinţe ale naturii, 2008, nr. 7(17), pp. 117-121. Available at: http://studiamsu.eu/wp-content/uploads/24-p117-121.pdf (accessed 25.07.2018).
[53] National Bibliometric Instrument. Available at: https://ibn.idsi.md/ (access 02.08.2018).

About authors

Țurcan Nelly. Doctor habilitat in Sociology, Senior Researcher at the Information Society Development Institute and University Professor at Moldova State University. Research interests: scholarly communication, open access, open science, bilbiometrics, scientometrics.
tsurcannelly@gmail.com

Cujba Rodica. Information Society Development Institute, Laboratory of Information and Communication Technologies; Technical University of Moldova, Scientific Investigation Division. Research interests: science of science, scientometrics, bibliometrics, research information systems.
r.cujba@gmail.com

New Approaches to Macroeconomic Stability

V.M. Postolaty
Institute of Power Engineering
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The structure of the economy of the Republic of Moldova was reviewed and the analysis of the main macroeconomic indicators, including the energy sector, was conducted. For a long period, data on the state of Moldova's energy, technical and economic indicators and development trends have been analyzed. Particular attention is paid to the definition of changes in the value of the real gross domestic product (GDP), taking into account the coefficient of deflation. The quantitative dependence of GDP on the volumes of "Output" and "Intermediate Consumption" is shown. It is revealed that the more "Intermediate Consumption", the lower the GDP, ceteris paribus. The major share of the cost of the industry sector is covered by "Intermediate Consumption", which in turn is higher, the higher the tariffs for energy, materials and other services provided by the industries to each other. It was concluded that tariff growth should not overtake real GDP growth over the past few years. The results of the calculations and their analysis show that, in reality, the growth of tariffs is far ahead of the growth of real GDP, which does not contribute to the stable development of the country's economy. It was proposed to revise tariffs, in particular for energy resources, and to bring the rates of their change in line with the growth rates of real GDP. An approach has been formulated for determining the marginal levels of tariffs, based on the condition that their growth rates do not exceed the growth rates of real GDP.
Keywords. Gross domestic product, intermediate consumption, tariffs for energy resources.
DOI: 10.5281/zenodo.2650960

Noile abordări ale stabilităţii macroeconomice

V.M. Postolatii
Institutul de Energetica
Republica Moldova, Chişinău

Rezumat. A fost revizuită structura economiei Republicii Moldova şi a fost efectuată analiza principalilor indicatori maroeconomici, inclusiv a sectorului energetic. Pentru o perioada indelungata au fost analizate datele privind starea sectorului energetic din Moldova, indicatori tehnici şi economici şi tendintele de dezvoltare. O atenţie deosebită este acordată determinării variaţiilor produsului intern brut (PIB) real, ţinând cont de coeficientul de deflaţie. Este prezentată dependenţa cantitativă a PIB-lui de volumul "Producţie" şi "Consum Intermediar". S-a constatat că cu cât "C onsumul intermediar "este mai mare, cu atât PIB-ul este mai mic, în cazul altor conditii egale. Ponderea mai mare a cheltuielilor ramurilor din economie este suportată pentru "Consumul intermediar", care la rândul său sunt mari, cu cât mai mult se majorează tarifele la energie, materiale şi alte servicii furnizate reciproc de ramurile industriale. S-a ajuns la concluzia că creşterea tarifelor nu ar trebui să depăşească creşterea PIB-lui real din ultimii ani. Rezultatele calculelor şi analizele obţinute denotă că, în realitate, creşterea tarifelor depăşeşte cu mult creşterea PIB-lui real, fapt ce nu contribuie la dezvoltarea stabilă a economiei ţării.
Se propune revizuirea tarifelor, în special pentru resursele energetice, şi aducerea ratelor de schimbare a acestora în conformitate cu ratele de creştere a PIB-lui real. S-a stabilit o abordare pentru determinarea valorilor marginale ale tarifelor, în baza condiţiei ca ratele lor de creştere să nu depăşească ratele de creştere a PIB-lui real şi în acelaşi timp să se ţină cont de ratele de creştere prevăzute ale PIB-lui, precum şi de indicele mediu anual al preţurilor de consum (rata inflaţiei).
Cuvinte- cheie. Produsul intern brut, consumul Intermediar, tarifele pentru resursele energetice.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

В.М. Постолатий
Институт энергетики, Республика Молдова, Кишинев

Аннотация. Рассмотрена структура экономики Республики Молдова и проведен анализ основных макроэкономических показателей, в том числе энергетического сектора. За длительный период проанализированы данные о состоянии энергетики Молдовы, о технических и экономических показателях и тенденциях развития. Особое внимание уделено определению изменения величины реального валового внутреннего продукта (ВВП) с учетом коэффициента дефляции. Показана

© Постолатий В.М. 2019

количественная зависимость ВВП от объемов «Выпуска» и «Промежуточного потребления». Выявлено, что чем больше «Промежуточное потребление», тем меньше ВВП, при прочих равных условиях. Основную долю затрат отрасли экономики несут на покрытие «Промежуточного потребления», которое в свою очередь тем выше, чем большими являются тарифы на энергию, материалы и другие услуги, оказываемые отраслями экономики друг другу. Сделан вывод о том, что рост тарифов не должен обгонять рост реального ВВП за ряд последних лет. Результаты расчетов и их анализ показывают что, в действительности рост тарифов значительно опережает рост реального ВВП, что не способствует стабильному развитию экономики страны. Предложено пересмотреть тарифы, в частности на энергоресурсы, и привести темпы их изменения в соответствие с темпами роста реального ВВП. Сформулирован подход к определению предельных уровней тарифов, исходя из условия, чтобы темпы их увеличения не превышали темпы роста объема реального ВВП и чтобы при этом учитывались плановые уровни роста ВВП, а также среднегодовой индекс потребительских цен (коэффициент инфляции).

Ключевые слова. Валовый внутренний продукт, промежуточное потребление, тарифы на энергетические ресурсы.

Введение

Основными целями экономической деятельности государства является обеспечение намечаемого роста экономических показателей и улучшение уровня жизни населения. Осуществить эти цели можно при условии макроэкономической стабильности и исключения негативных факторов, тормозящих или препятствующих достижение намечаемых показателей экономики и решения социальных задач.

Экономика является одним из сложнейших видов деятельности общества и государства. Тем не менее, как любая система, экономика, несмотря на ее сложность, описывается рядом специальных математических моделей [1-7]. Именно математическое описание позволяет осуществлять управление процессами в экономике. Основополагающими трудами в этой области являются разработки межотраслевых балансов и национальных счетов [1;8-10]. На основании этих работ удалось разработать структурную схему экономической системы и выявить количественные взаимосвязи структурных блоков отраслей и тарифов [11-13].

Цель исследований настоящей работы состоит в продолжении исследований взаимных связей тарифов и макроэкономических показателей, в поиске путей укрепления энергетического комплекса Республики Молдова. Это одна сторона. Вторая сторона вопроса состоит в том, каким образом содействовать успешному развитию экономики страны и ее стабильности, а конечном счете улучшению социального положения населения [14]. Этими аргументами обуславлена необходимость рассмотрения взаимной связи тарифов и макроэкономических .

Общее состояние энергосектора

Прежде всего, необходимо указать, о чем идет речь. Речь идет о топливе, речь идет об электроэнергии, речь идет о теплоэнергии.

В первую очередь необходимо коснуться того, а каково общее состояние энергетики Республики Молдова в части потребления топливных ресурсов, переработки и доведения их до потребителей.

Имеющиеся данные [15,16]. свидетельствуют о том, что потребление первичных топливных ресурсов в Республике Молдова растет, и к настоящему времени уже превысило 3,5 млн. тонн условного топлива. На рисунке 1 показано как изменяется по годам потребление топлива. Основным видом топлива является природный газ. Доля потребления природного газа составляет порядка 35%-ов (Рис. 2). Раньше доля природного газа в общем балансе потребления газа была значительно выше. Она составляла 50 и 60% - в отдельные годы. Потребление топлива в энергетике снижается и к настоящему времени составляет порядка 25% от общего потребления (Рис. 3).

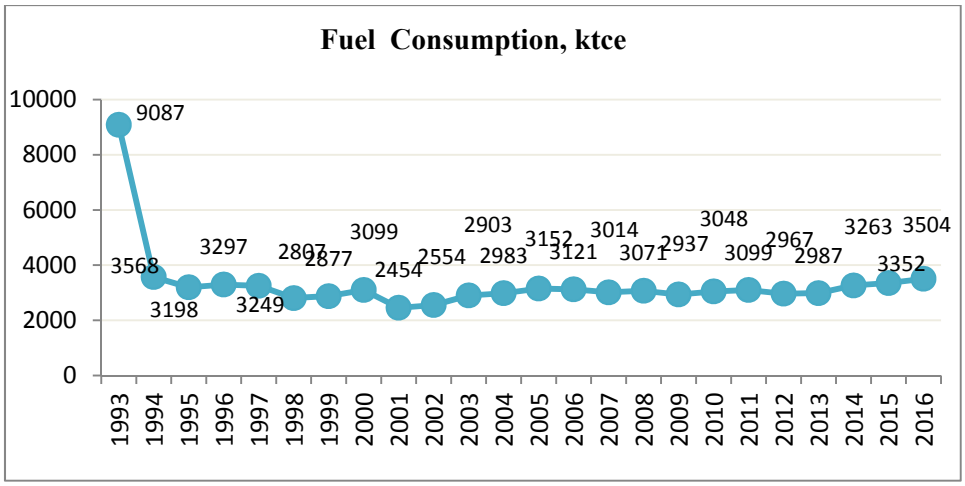


Figure 1. Total consumption of primary fossil fuels

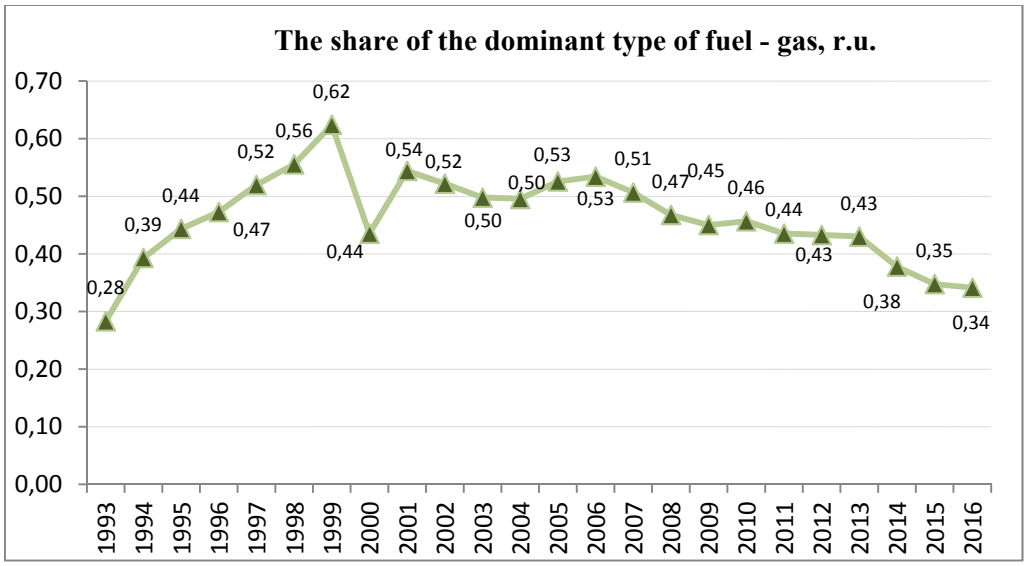


Figure 2. The share of the main type of fuel in fuel balance

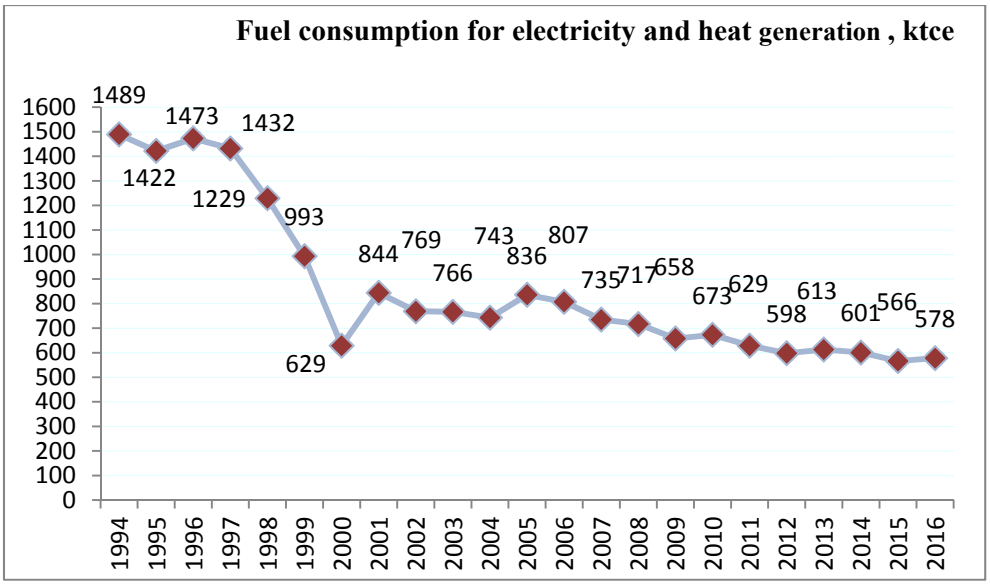


Figure 3. Fuel consumption for electricity and heat production

Потребление топлива в коммунальном хозяйстве растет (Рис. 4).

Из приведенных данных мы видим, что потребление топлива на производство электроэнергии и теплоэнергии снижается.

Но, вместе с тем, потребление топлива в коммунальном хозяйстве, в различных сферах непроизводственного характера возрастает.

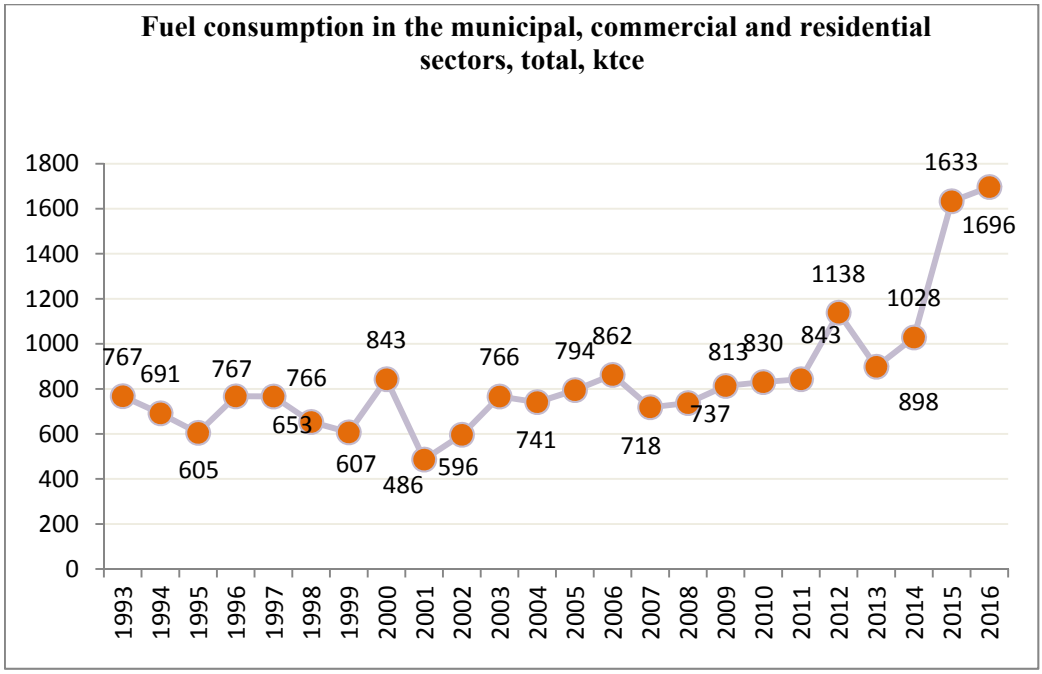


Figure 4. Fuel consumption in the communal, commercial and residential sectors, total.

Электроэнергетический сектор.

Потребление электроэнергии в Республике Молдова в целом стабилизировалось, и в последние годы находится не многим больше 4 млрд. кВт.часов в год (Рис. 5).

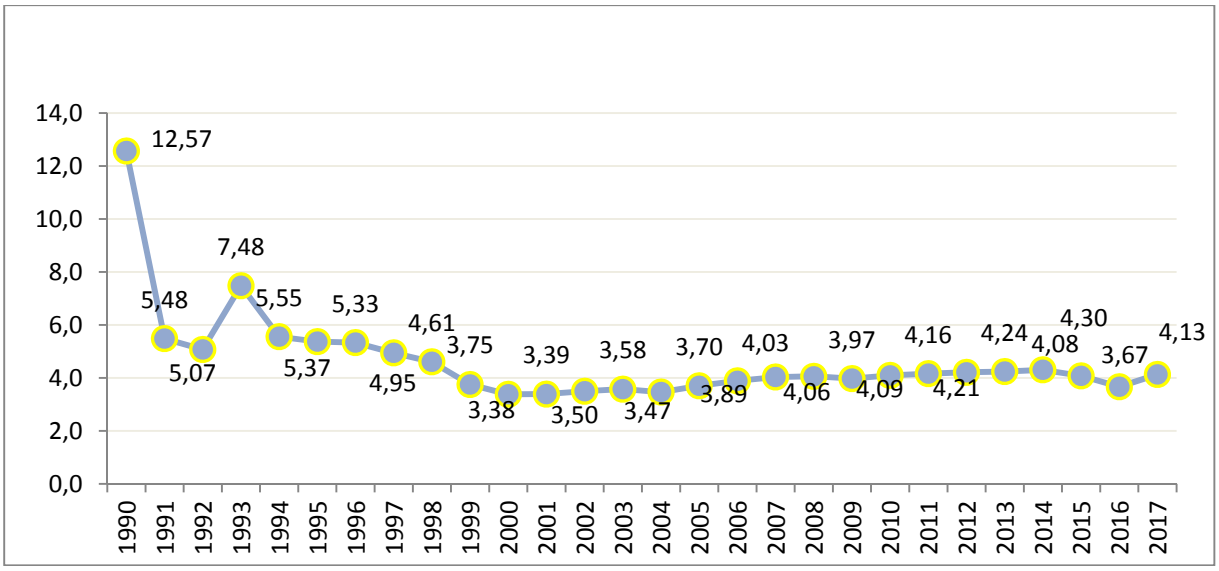


Figure 5. Electricity consumption in the Right Bank region (GWh)

Собственная выработка электроэнергии в Правобережье составляет менее одного миллиарда киловатт-часов.

В 2016 г. выработка электроэнергии в Правобережье была на уровне 900 миллионов киловатт-часов.

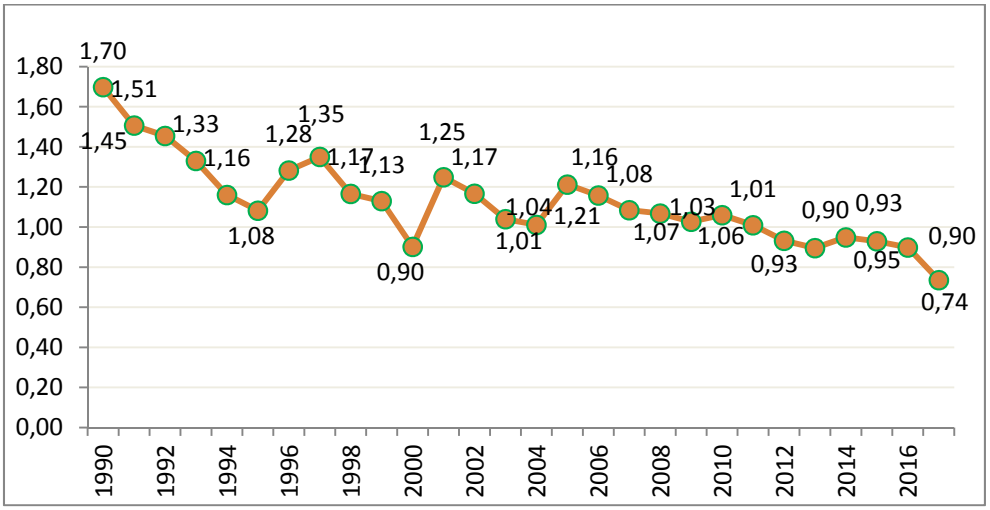


Figure 6. Power generation in the Right Bank, GWh

Но, она постепенно снижается. Вместе с тем, растет доля импорта (Рис. 7), хотя импортируемая электроэнергия дороже, чем собственно производимая на теплоэлектростанциях в Правобережье, работающих по комбинированному циклу производства электроэнергии и теплоэнергии, будучи электростанциями когенерационными.

Электроэнергия, вырабатываемая в Правобережье самая дешевая. По сравнению с той энергией, которую Республика Молдова получает и платит как за импортируемую, она процентов на 20% дешевле, чем производимая в Левобережье.

В целом Молдова, (Правобережье и Левобережье), вместе взятые, суммарно ежегодно теряет более 100 тыс. тонн условного топлива, из-за недовыработки на Кишиневских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 и из-за несогласованного наиболее экономичного графика долевого покрытия баланса электроэнергии на когенерационных электростанциях (Правобережья) и конденсационной электростанции Молдавской ГРЭС (Левобережья).

На Кишиневских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, как электростанциях когенерационного типа, осуществляется выработка двух видов энергии электрической и тепловой энергии, а на Молдавской ГРЭС (в Приднестровье) производится только один вид энергии – электрическая.

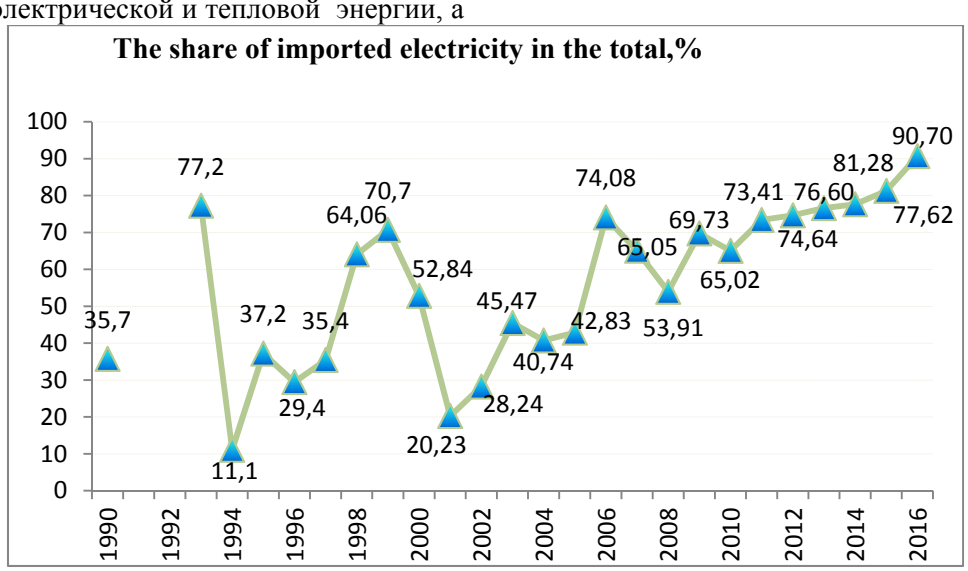


Figure 7. The share of imported electricity in the total.

В самой технологии уже заложено различие удельных расходов топлива на единицу энергии. В когенерационном цикле удельные расходы топлива в целом на выработку единицы энергии ниже, чем на конденсационных электростанциях, к которым относится самая крупная электростанция, расположенная в Левобережье – Молдавская ГРЭС, от которой Правобережье получает основную долю электроэнергии.

На когенерационных ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 в Правобережье удельные расходы топлива на единицу производимой энергии, приведенной либо к электрическим единицам измерения или тепловым, на 20-25% ниже, чем на конденсационной Молдавской ГРЭС, от которой осуществляется поставка электроэнергии из Левобережья в Правобережье.

Следует отметить, что преимущества когенерационных ТЭЦ по сравнению с использованием раздельно конденсационных электростанций для выработки электрической энергии и котельных – для выработки только тепловой энергии, проявляются только при определенных условиях, а именно: при оптимальном соотношении долей выработки на них электрической и тепловой энергии от общего количества производимой энергии.

Оптимальная область этого соотношения лежит в пределах производства электроэнергии 40-50% и тепловой энергии 60-50% от общей.

При других соотношениях этих долей преимущества когенерации снижаются, а при крайних режимах ТЭЦ могут оказаться по своим показателям как котельные (если на них вырабатывается только тепловая энергия) или как конденсационные (если на них производится только электрическая энергия).

Поэтому ТЭЦ экономически выгодно эксплуатировать в режиме оптимального соотношения выработки на них электрической и тепловой энергии.

Другими словами, это требование на ТЭЦ сопровождается зависимостью производства электроэнергии от величины вырабатываемой тепловой энергии, отпускаемой во внешнюю сеть.

Анализ показателей работы КишиневскихТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 однозначно свидетельствует о прямой взаимной зависимости производства на них этих двух видов энергии.

Недогрузка по выработке электроэнергии Кишиневских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 происходит из-за снижения выработки на них тепловой энергии и соответствующего уменьшения поставки ее потребителям системы централизованного теплоснабжения г. Кишинева.

Данные свидетельствуют о том, что выработка тепловой энергии на ТЭЦ-1 и

ТЭЦ-2 непрерывно снижается. Это сопровождается соответствующим снижением выработки и электроэнергии на них.

Почему и чем обусловлено снижение теплопотребления в системе централизованного теплоснабжения г. Кишинева?

Зависимости снижения объемов потребления тепловой энергии в системе централизованного теплоснабжения показаны на рис. 8.

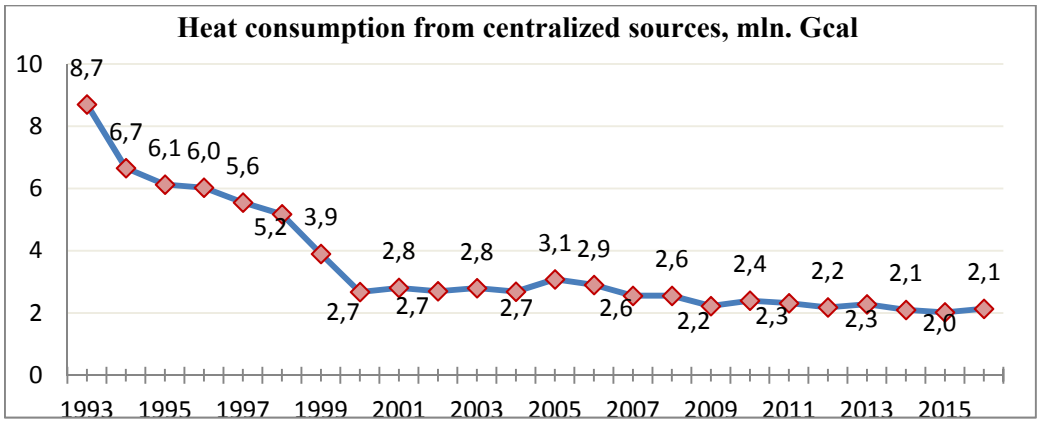


Figure 8. Heat consumption of from centralized sources

За последние годы наблюдается более, чем двукратное снижение выработки тепловой энергии. Почему это происходит? В Кишиневе суммарная площадь жилищного фонда не уменьшилась. Не поменялись и требования к параметрам теплоносителя. Требования к качеству теплоэнергии сохранились, а суммарная площадь жилого фонда растет. Другое дело, что часть потребителей тепловой энергии сами отключаются. Из-за чего? Есть причины. О них надо сказать и надо и надо принимать меры для улучшения ситуации. Потребление теплоэнергии в системе централизованного теплоснабжения падает, но, в то же время, оно растет в системах децентрализованного теплоснабжения (Рис. 9).

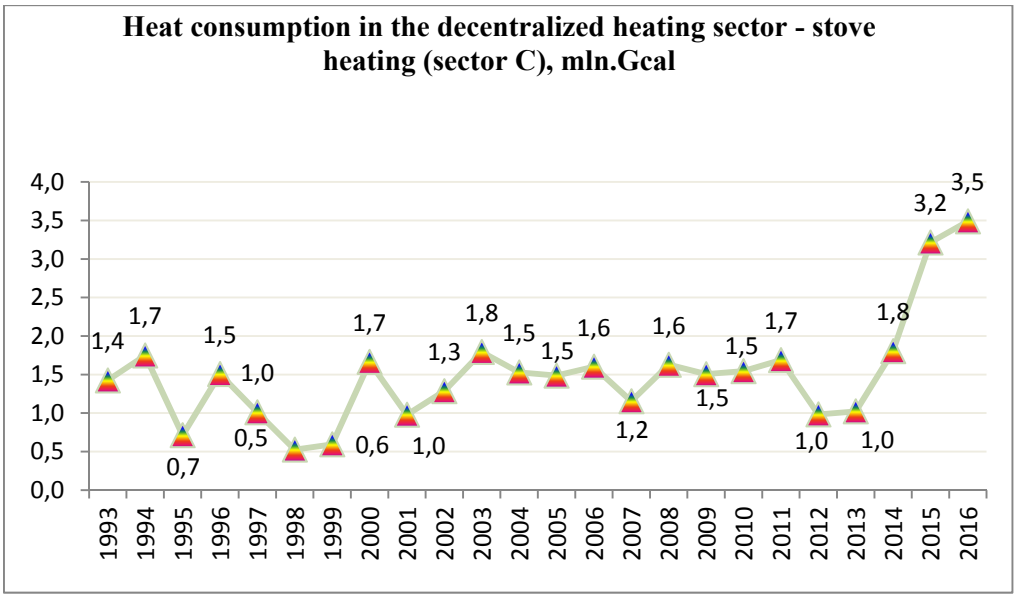


Figure 9. Heat consumption in the decentralized heating sector - stove heating (sector C).

Оказывается, что главный вопрос заключается в тарифах [17-20].

Потребление тепловой энергии за период, немногим более, чем за десять лет, снизилось более, чем в два раза.

Соответственно и выработка электроэнергии уменьшилась в два раза. Причиной тому является необоснованно высокий рост тарифов. Тарифы на электроэнергию постоянно росли. Совсем недавно они достигли 13,4 центов за киловатт.час. В последнее время наблюдается некоторое снижение тарифов на электроэнергию, но они остаются все же чрезмерно высокими.

Тарифы на теплоэнергию.

Тарифы на теплоэнергию постоянно возрастали. В долларовом выражении рост тарифов был относительно замедленным, но в текущих ценах этот процесс шел весьма интенсивно. К настоящему времени тариф на теплоэнергию в текущих ценах возрос более, чем в два раза, по сравнению с 2009 г., принятым в качестве базового.

Основным аргументом, используемым для обоснования высокой стоимости теплоэнергии, является утверждение о том, что высокой является цена на природный газ, являющимся основным видом топлива для производства тепловой энергии. При этом делается акцент на то, что в себестоимости производимой тепловой (и электрической) энергии затраты на топливо (природный газ) составляют порядка 80%-ов от общей себестоимости вырабатываемой энергии.

Но, если это так, то почему не отслеживается динамика изменения цены на импортируемый природный газ и не вносятся соответствующие коррективы в тарифы на теплоэнергию. В последнее время наблюдается постепенное снижение цены на импортируемый природный газ. Поэтому мотивирование тем, что тариф на теплоэнергию остается высоким из-за цены на газ, оказывается неправомерным. Снижение цены на импортируемый газ в последнее время составило более, чем в 1,7 раза, по сравнению с 2009 годом. Природный газ является основой для производства теплоэнергии, и его цена снижается, тем не менее тариф на теплоэнергию остается неизменным на прежнем высоком уровне.

Выполнить анализ данных затрат на импорт природного газа оказалось довольно сложно. Те организации, которые обязаны публиковать соответствующие данные, не приводят эти сведения. На приведенном рисунке (10, 12, 13) показано, как изменялись цены на импорт газа и отпускной тариф на теплоэнергию.

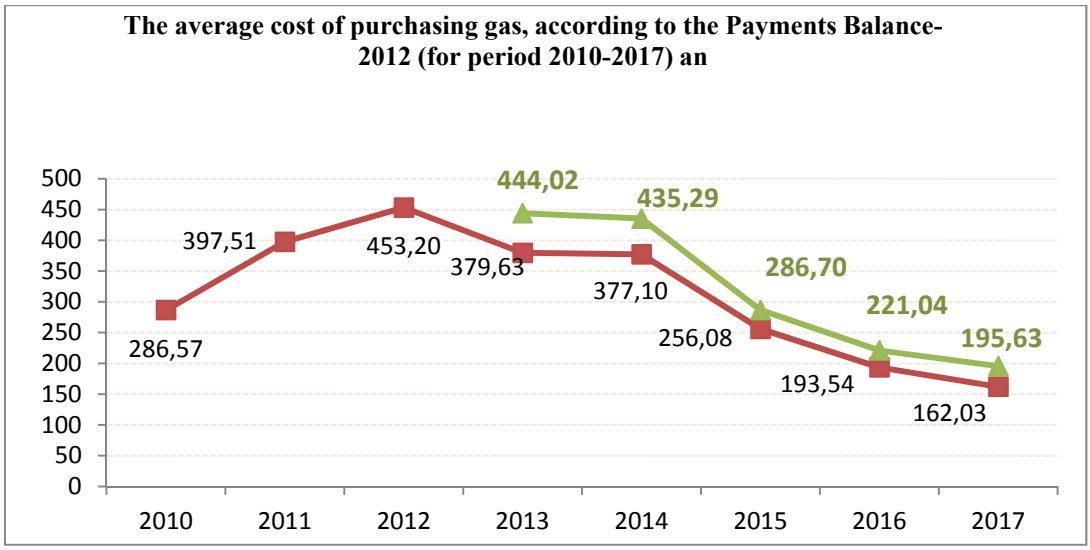


Figure 10. The average cost of purchasing gas, according Payments Balance-2012 (2010-2012) and Conturi Internationale-2017 (2013-2017)

Тариф на газ, отпускаемый в Республике, все же значительно превышает удельную стоимость импорта газа.

Тем не менее, тариф на газ для потребителей постепенно снижается. При сопоставлении динамики снижения тарифа на газ с динамикой макроэкономического

показателя (ВВП) видно, что они различаются незначительно.

Тарифы на электроэнергию

В последнее время замечена тенденция некоторого снижения тарифов на электроэнергию, но, все же они остаются еще довольно высокими (Рис. 11).

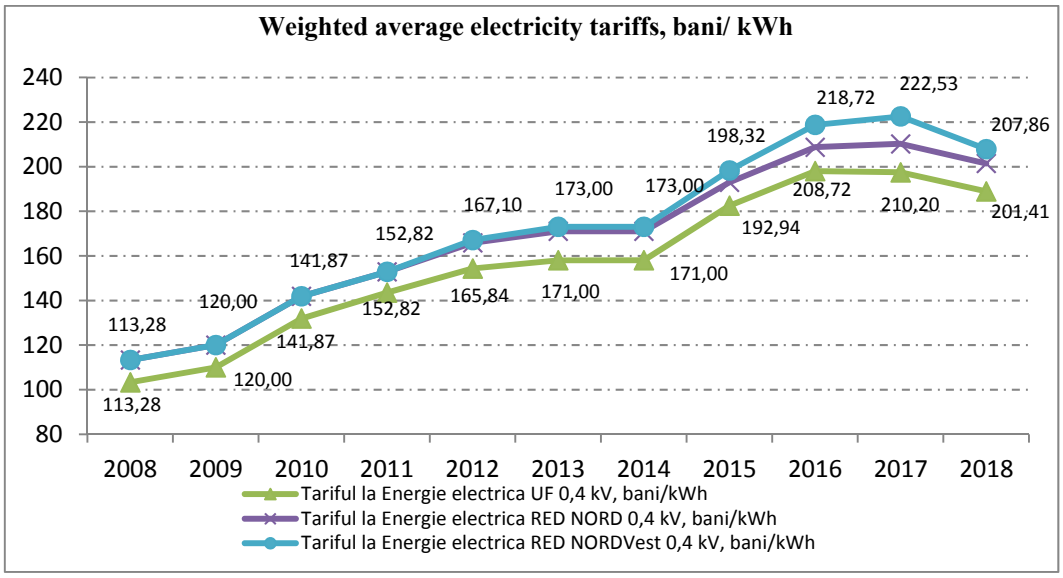


Figure 11. Weighted average electricity tariffs

Тарифы на теплоэнергию.

Теплоэнергия держит первенство по величине показателя тарифа. Если в 2009 году тариф в АО «Термоэлектрика» составлял 540 лей за одну Гигакалорию, то в 2018 г. и в начале 2019 г. тариф составил 1122 лей за одну Гигакалорию, т.е. за данный период произошло двукратное увеличение тарифа (Рис. 12,13). В АО CET NORD тариф достиг 1220 лей за одну Гигакалорию.

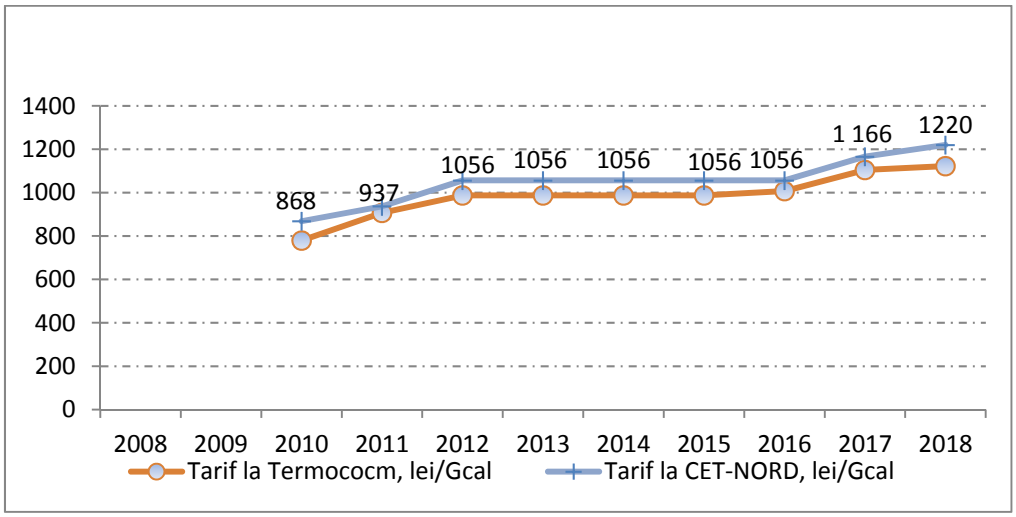


Figure 12. Weighted average heat tariffs, lei/Gcal

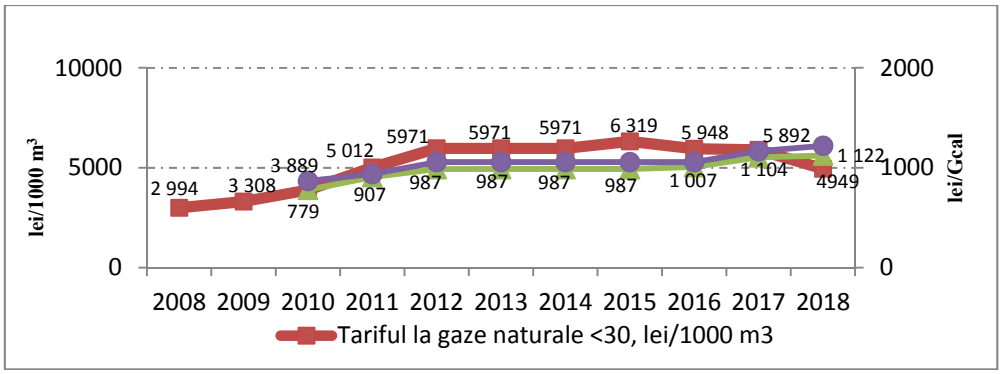


Figure 13. Comparison of natural gas and heat tariffs (lei/Gcal)

Место тарифов в структуре макроэкономических показателей.

Если сопоставить приведенные графики, с графиком, показанным на рисунке 14, то видно, что рост тарифов обгоняет темпы роста реального «Валового внутреннего продукта (ВВП)», который является ключевым показателем развития экономики страны и не только Молдовы, но применяемый в мировой практике для оценки уровня экономического развития стран. Видно, что приведенные показатели изменения тарифов находятся выше, чем ВВП. Выше всех находится зависимость тарифов на тепловую энергию, и она имеет тенденцию к дальнейшему росту.

Для того, чтобы определить, до которого уровня вообще можно было бы повышать тарифы, потребовалось вникнуть в сущность национальных счетов, которыми Институт Экономики Академии наук давно занимается. Раньше это были межотраслевые балансы. В настоящее время бюро Статистики ограничилось составлением национальных счетов [8-9]. Данные макроэкономических показателей отслеживаются и публикуются Государственным бюро статистики в Статистических Сборниках и таблицах национальных счетов. Эти данные доступны для анализа. Из них можно установить, что будет дальше, если продолжить бесконтрольное дальнейшее

Установлено, что, чем больше «Промежуточное потребление», тем меньше «Валовая добавленная стоимость» и тем меньше «Валовый Внутренний Продукт - (ВВП)», т.е. тем меньше благ остается для «Конечного Потребления». Анализ данных, приведенных в таблицах «Национальных счетов» показывает, что за повышение тарифов. Если представить, что если все организации и ведомства, участвующие в материальном производстве, вдруг договорятся о дальнейшем повышении тарифов на энергетические ресурсы, на материальные ресурсы и на все услуги, оказываемые отраслями экономики друг другу, то процесс, как ком будет нарастать. Он будет неудержимым.

Необходимо было разобраться в основных экономических категориях: что такое «Выпуск», что такое «Промежуточное потребление», что такое «Валовая добавляемая стоимость», и, в конечном счете, что такое «Валовый Внутренний Продукт» и что такое «Конечное Потребление», которое предусматривает финансовое обеспечение Государственного аппарата, образования, всей социальной сферы, Государственных бюджетных учреждений, науки, мероприятий по экологии, создание запасов, обороны и др.

Тарифы отражены в «Промежуточном Потреблении». Это те расходы, которые отрасли оказывают друг другу в процессе материального производства и той деятельности, которая идет в зачет Выпуска». Для наглядного анализа была разработана структурная схема, отражающая взаимные связи основных блоков национальных счетов. последнее десятилетие объем «Промежуточного Потребления» (ПП) составлял 55-60% от общего объема «Выпуска». Если представить себе, что все вдруг решат повысить тарифы еще на 40%, то «Валовая Добавленная Стоимость» окажется равной нулю, и, соответственно, объем ВВП приблизится к нулевой

величине. Поэтому вопрос регулирования тарифов в зависимости от объемов ВВП является ключевым в экономической деятельности и жизни государства. Вместе с этим были установлены причины, почему описанные выше технические показатели в энергетике ухудшаются.

Дальнейшие усилия были направлены на то, чтобы установить взаимные связи энергетики и экономики. В результате согласованного анализа была установлена динамика изменения реального объема «Валового Внутреннего Продукта (ВВП)», с учетом коэффициента дефляции, величина которого с 2009 г. публикуется в статистических сборниках и национальных счетах Бюро Государственной статистики. Динамика изменения объема реального ВВП за последнее десятилетие показана на графике (Рис. 14). Объем реального ВВП за этот период увеличился примерно в 1,4 раза. Как уже было показано, некоторые тарифы за этот же период возросли более, чем в два раза.

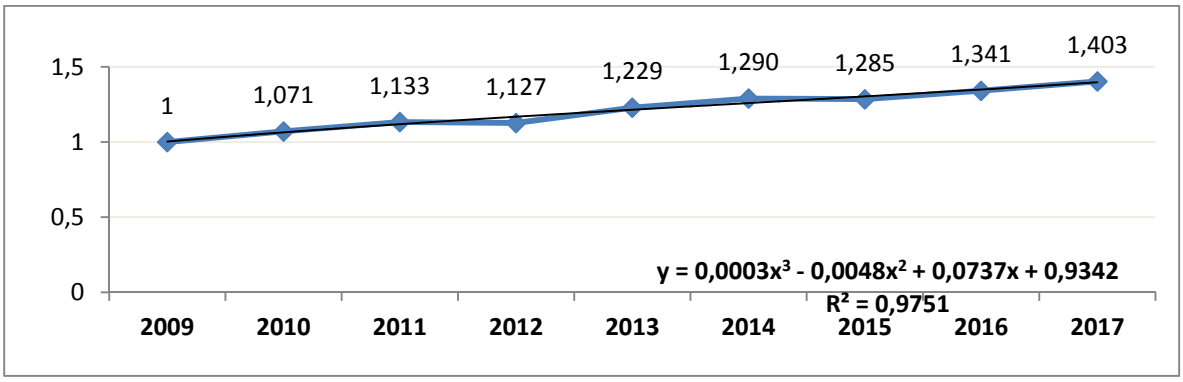


Figure 14. Growth in real GDP, relative units

Поэтому основная идея новых предложений свелась к тому, чтобы установить те зависимости, ту модель, по которой можно было бы определять и устанавливать предельные уровни тарифов, которые скоординированы с ростом реального ВВП, т.е. чтобы динамика роста тарифов согласовывалась с динамикой роста реального ВВП. Такая модель была предложена [11]. Ее основные принципиальные положения с дополнениями описаны ниже.

Новая модель установления предельных уровней тарифов.

Основная идея нового подхода состоит в том, чтобы при определении предельно допустимых уровней тарифов обеспечивались следующие условия: темпы роста тарифов (ΔТ) не должны быть выше темпов роста объема реального ВВП (ΔВВП), принимались во внимание принятые плановые показатели роста ВВП и учитывался среднегодовой индекс потребительских цен.

Если обозначить действующее значение тарифа ($Т_д$), то новое допустимое значение тарифа (Тн) будет определяться выражением:

$$Т_н = \frac{Т_д}{К} \cdot \Delta Т, \qquad (1)$$

где: $Т_д$ – действующий тариф в текущих ценах на рассматриваемый момент времени (Х); К – коэффициент, характеризующий насколько отношение действующего тарифа в текущих ценах к базовому году, (например, к 2009 г.) превысило рост реального ВВП за то же время. Иными словами, коэффициент (К) характеризует насколько произошло «отклонение» роста тарифа в текущих ценах от роста реального ВВП:

$$К = \frac{\Delta Т_д}{\Delta ВВП} \qquad (2)$$

Здесь: $\Delta Т_д$ - изменение величины действующего тарифа по отношению к величине тарифа в базовом году, в относительных единицах; ΔВВП - изменение реального ВВП по отношению к базовому году, в относительных единицах.

В работе [13] отношение $\left(\frac{Т_д}{К}\right)$ названо расчетным (базовым) тарифом, т.е.

$$Т_р = \frac{Т_д}{К}. \qquad (3)$$

Формула (4) с учетом (3) примет следующий вид:

$$Т_н = Т_р \cdot \Delta Т. \qquad (4)$$

В формуле (4) величина (ΔТ) представляет собой предельно допустимый (позволительный с точки зрения устойчивого развития экономики) уровень увеличения тарифа, определяемый в относительных единицах в рассматриваемый момент времени (Х) – (год или месяц) по отношению к расчетному значению тарифа ($Т_р$).

Величина (ΔТ) в случае роста (ВВП) будет положительной, а в случае снижения (ВВП) – отрицательной.

В случае роста (ВВП) величину (ΔТ) можно определять по выражению, которое будет иметь следующий вид:

$$\Delta Т = \Delta ВВП' \cdot \alpha \cdot \frac{1}{И_{пц}} \qquad (5)$$

где: ΔВВП′ – величина, характеризующая темп изменения (ВВП) в рассматриваемый момент времени (Х), (год или месяц), т. е. индекс изменения ВВП, в относительных единицах

При отсутствии данных (ΔВВП′) в рассматриваемый момент времени (Х) его величина должна быть определена путем прогноза на основании данных изменения (ВВП) в предшествующий доверительный период времени.

Практика показывает, что официальные данные Бюро Статистики публикует с отставанием на 1-1,5 года. Если решение об изменении тарифа нужно принимать в текущий момент времени, то (ΔВВП′) необходимо прогнозировать.

Для этой цели удобно воспользоваться производной основной функции изменения реального (ВВП) по годам за определенный ряд лет (например, за последние n=10 лет, с 2009 г. ВВП=У(Xi), i=1÷n и взять для заданного времени (года или месяца Xi) первую производную (У′) этой функции. Это и будет изменение (ΔВВП′) в заданный момент времени (Xi), т.е. индекс изменения ВВП. Выражение функции, отражающей тренд изменения реального ВВП, в качестве примера показано на рис. 1. Оно имеет следующий вид для принятых исходных данных:

Выражение функции, отражающей тренд изменения реального ВВП, в качестве примера показано на рис. 21. Оно имеет следующий вид для принятых исходных данных:

$$Y=0{,}0003\cdot X^3-0{,}0048\cdot X^2+0{,}0737\cdot X+0{,}9342. \qquad (6)$$

Первая производная от функции (6) будет иметь вид:

$$\Delta ВВП'(X)=Y'=0{,}0003\cdot 3\cdot X^2-0{,}0048\cdot 2\cdot X+0{,}0737. \qquad (7)$$

В приведенную выше формулу (5) входит коэффициент (а). Он отражает плановую директиву развития экономики в виде планируемого уровня роста ВВП. Коэффициент (а) в нашем случае удобно выразить в следующем виде:

$$\alpha = \frac{1}{А}, \qquad (8)$$

где А – коэффициент опережения роста ВВП, планируемый, например, в Республике Молдова до 2020 г. и установленный Законом Республики Молдова №166 от 11.07.2012 «Об утверждении Национальной стратегии развития «Молдова-2020»» [14]. В базовом сценарии предполагается среднегодовой темп роста ВВП до 2020 г. в размере 4,7%, т.е. в относительных единицах А=1,047.

В формуле (8) учитывается также среднегодовой индекс потребительских цен ($И_{пц}$), получивший название «Коэффициент инфляции». Его значения приведены выше в таблице 1 и на рис. 2. Данный коэффициент изменяется в пределах 104÷109% или 1,04÷1,09 в отн. ед.

Выражение (4), отражающее новое значение тарифа (предельно допустимое, позволительное), с учетом (5-8) примет следующий вид:

$$T_H = \frac{T_D \Delta ВВП}{КАИ_{ПЦ}} \qquad (9)$$

где

$Т_д$ - действующее значение тарифа в денежных единицах; ΔВВП′ - индекс роста («приращение») реального ВВП, в относительных единицах в рассматриваемый момент времени; К – коэффициент «отклонения» тарифа, выражается формулой (5); А – плановый коэффициент роста ВВП, в отн. ед.; $И_{пц}$ - среднегодовой индекс потребительских цен, в отн. ед.

Используя данную методику, а также приведенные выше данные далее произведены расчеты предельных уровней повышения тарифов на основные энергоресурсы.

Результаты расчетов предельных уровней повышения тарифов с

использованием данных национальных счетов.

Расчет допустимых (позволительных) уровней повышения тарифов на рассматриваемые виды энергоресурсов произведен по формуле (9) на период конца 2018 г. - начало 2019 г. Расчет предельных уровней тарифа на тепловую энергию был выполнен в работе [13]. Для цельности изложения результаты этих расчетов частично приводятся заново.

По приведенной методике расчет предельных допустимых (позволительных) тарифов на рассматриваемые энергоресурсы произведен в табличном виде и приведен в Таблице 1.

Таблица 1

Расчет предельно допустимых значений тарифов на природный газ, электрическую и тепловую энергию, на начало 2019 г.

№ п/п	*Расчетные величины*	*Единицы измерения*	*Природный газ*	*Электро-энергия*	*Тепловая энергия*
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
1.	Действующий тариф ($T_д$): на природный газ	лей/1000 м^3	4949	-	-
	на электроэнергию	бань/кВт.ч	-	189,9	-
	на тепловую энергию	лей/Гкал	-	-	1122
2.	Индекс роста реального ВВП (уравнение (10)): ΔВВП′(X)= Y′(X)=0,0003·3·X^2-0,0048·2·X+0,0737 при X=10 (с 2009 г.)	отн. ед. % отн. ед.	0,0677 6,77 1,0677	0,0677 6,77 1,0677	0,0677 6,77 1,0677
3.	Рост тарифа по отношению к базовому (2009) году	отн. ед.	1,496	1,717	2,077
4.	Рост реального ВВП по отношению к базовому (2009 г.), прогноз на начало 2019 г. согласно уравнению (9): ΔВВП(X)= Y(X)=0,0003·X^3-0,0048·X^2+0,0737·X+ +0,9342 (при X=10)	отн. ед.	1,4913	1,4913	1,4913
5.	Коэффициент «отклонения» роста тарифов от роста реального ВВП, (К) (п3/п4)	отн. ед.	1,066	1,2238	1,48
6.	Плановый коэффициент роста ВВП, (А)	отн. ед.	1,047	1,047	1,047
7.	Среднегодовой индекс потребительских цен ($И_{пц}$), согласно уравнения на рис. 2 (прогноз)	отн. ед.	1,0772	1,0772	1,0772
8.	Новое значение предельно допустимого тарифа ($T_н$) по формуле (12):				
	- на природный газ	лей/1000 м^3	4671,6		

	- на электроэнергию	бань/кВт.ч		156,13	
	- на тепловую энергию	лей/Гкал			762,85
9.	Требуемое снижение тарифа по отношению к действующему (на начало 2019 г.)	%	5,6	17,78	32,0

Проведем краткий анализ полученных результатов. Остановимся на конечных результатах.

Для того, чтобы соблюсти «синхронизацию» темпов роста предельной величины тарифов на энергоресурсы с темпом роста реального ВВП, необходимо незамедлительно привести уровни тарифов в соответствие с уровнем реального ВВП, и осуществить мероприятия, обеспечивающие:

- снижение тарифа на природный газ не менее, чем на 5,6%;
- снижение тарифа на электроэнергию не менее, чем на 17%, (необходимо изменить мнение о том, что государство должно Компании распределительных сетей в результате сформулированного понятия «финансового отклонения» в предыдущие годы; утвердиться в том, что все наоборот: поставщики должны государству);
- что касается тарифа на теплоэнергию, то его надо снизить на сегодняшний день не менее, чем на 32%.

Если это не сделать сегодня, то далее становится все хуже. Энергетика и Экономика в опасности. Необходимо всерьез анализировать тарифы и их ключевую роль в развитии энергетики, экономики и социальной сфере.

В данной статье речь не идет о том, как устанавливать, как рассчитывать тарифы, как учитывать затраты, что и как обосновывать.

Речь идет о том, как определять верхний (допустимый) уровень тарифов, исходя из того, чтобы финансовая система реального балансировалась в Республике, чтобы рост тарифов не шел в противоречие с решением задач социального плана в обществе и не тормозил дальнейшее развитие энергетики и экономики.

При наличии других исходных данных могут быть получены другие конкретные результаты расчетов. В статье приведены результаты, которые основаны на принятых исходных данных. При продолжении работ по расчету тарифов результаты могут быть уточнены.

Но, главное, в работе показана методическая сторона подхода к решению проблемы установления предельных уровней тарифов, исходя из анализа макроэкономических показателей, учета необходимости решения проблем стабильности и устойчивого развития экономики и социальной сферы, а также и решения проблем дальнейшего успешного развития энергетики.

Данная работа показывает, что тарифами надо управлять. Процессы в энергетике надо регулировать. Взаимоотношения между отраслями экономики надо регулировать, их показатели надо математически описывать, оценивать вклад каждой отрасли в состав общих показателей экономики, в частности, вклад в общий объем ВВП. Такой подход покажет, кто и как способствует развитию экономики Республики.

Регулировать надо в энергетике и в экономике. Но, четко уяснить, что регулировать и в зависимости от чего?

На примере энергетики показано, что регулировать надо, прежде всего, тарифы, с учетом обратных связей по образу того, как это используется в технических системах автоматического регулирования.

В статье показано, что регулировать надо уровни тарифов в зависимости от показателей роста реального ВВП в экономике в целом. Только такой подход может обеспечить устойчивое развитие экономики и всех ее отраслей, в том числе и энергетики.

Следует отметить, еще одну сторону рассматриваемой проблемы. Тарифы, кроме того, играют важную роль и в обеспечении энергетической и экономической безопасности страны. Эти вопросы являются предметом дальнейшего анализа и детального рассмотрения для выработки соответствующих рекомендаций.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что действующие тарифы на энергетические ресурсы завышены, по сравнению с максимально

допустимыми, которые определены исходя из анализа динамики роста реального ВВП. Рост тарифов существенно обгоняет рост реального ВВП. Такую ситуацию вряд ли можно считать нормальной.

Аналогично опережающему росту тарифов на энергетические ресурсы имеет место нескоординированный рост тарифов на материалы и услуги в сфере производства, обусловленный и другими отраслями экономики. Все это является дестабилизирующими факторами, сдерживающими рост показателей экономики, в целом. В первую очередь это отражается на объеме ВВП, так как тарифы увеличивают объем промежуточного потребления, что сопровождается снижением валовой добавленной стоимости и, соответственно, ВВП. Данные, приведенные в таблице, показывают, что для выполнения условия координации роста тарифов с ростом реального ВВП тарифы уже в начале 2019 г. должны быть снижены в соответствии с указанными выше уровнями.

В дальнейшем, в случае устойчивого роста реального ВВП, тарифы на энергоресурсы соответственно могут быть

В дальнейшем, в случае устойчивого роста реального ВВП, тарифы на энергоресурсы соответственно могут быть

увеличены. Их новый уровень может быть рассчитан по методике, изложенной в настоящей статье, а также в работах [11-13].

Выводы

1. Установлено, что тарифы на энергетические ресурсы, а также на другие виды материальных ресурсов и услуг в производственной сфере составляют основную часть объема «Промежуточного потребления» (ПП). Показано, что, чем выше объем «Промежуточного потребления» (ПП), тем меньше объем «Валовой добавленной стоимости» (ВДС) и, соответственно, тем меньше объем «Валового внутреннего продукта» (ВВП).

2. На примере показателей экономики Республики Молдова с использованием данных национальных счетов выполнены расчеты изменения объема реального ВВП за прошедший десятилетний период, с 2009 г., принятого в качестве базового года, по 2018 г., а также прогноза на 2019 г. Установлено, что объем реального ВВП к 2017 г. по сравнению с 2009 г. увеличился в 1,403 раза. На период начала 2019 г. рост реального ВВП ожидается согласно прогноза в 1,49 раза по отношению к 2009 г.

3. Проведен анализ изменения тарифов на основные виды энергетических ресурсов:

- на природный газ, на электроэнергию и на тепловую энергию за последний десятилетний период, с 2009 г.

В расчетах использованы действовавшие средневзвешенные тарифы в текущих ценах. Увеличение тарифов к началу 2019 г. по сравнению с их значениями в 2009 г. составило:

- на природный газ в 1,496 раза;
- на электроэнергию – в 1,717 раза;
- на тепловую энергию – в 2,077 раза.

4. Для того, чтобы уравнять темпы роста тарифов на рассматриваемые вид энергетических ресурсов с темпом роста реального ВВП, а также учесть плановый коэффициент роста ВВП и среднегодовой индекс потребительских цен необходимы следующие снижения действующих тарифов:

- на природный газ – на 5,6 %;
- на электроэнергию – на 17,7%;
- на тепловую энергию – на 32%.

5. Предложенная методика установления предельно допустимых уровней тарифов может быть рекомендована, как универсальная, применительно не только к энергетическим ресурсам, но и к тарифам на различные виды материалов и услуг в производственной сфере экономики страны. Методика позволяет учесть планируемые показатели роста ВВП, а также среднегодовой индекс потребительских цен. Кроме того, методика может быть использована и для координации развития отраслей экономики страны или отдельных регионов.

Литература (References)

1. V. Leontiev. Economic essays. Theories, research, facts and politics. Per. From English – M.: Politizdat, 1990. Leontiev V.V. [Economicheskiye esse, Teorii, issledovanya, fakty I politika]. Per. s angl. – M.: Politizdat, 1990.
2. Granberg A.G. World of Vasily Leontiev. Economics of Modern Russia, No. 5), 1999.

Granberg A.G. Mir Vasiliya Leont'yeva. Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii, № 5), 1999.

3. Granberg A.G. Mathematical models of socialist economics M.Ekonomik, 1978. 350 p. Granberg A.G. Matematicheskiye modeli sotsialisticheskoy ekonomiki M.Ekonomika, 1978. 350 str.
4. Danzig. Linear programming; its applications and generalizations M., Progress, 1966, 600 p. Dzh. Dantsig. Lineynoye programmirovaniye; yego primeneniya i obobshcheniya M., Progress, 1966, 600 str.
5. Gametsky A.F., Solomon D.I. Mathematical modeling of microeconomic processes. Chisinau, Shtiintsa, 1996, 280 p. Gametskiy A.F., Solomon D.I. Matematicheskoye modelirovaniye mikroekonomicheskikh protsessov. Kishineu, «Shtiintsa», 1996, 280 s.
6. Gametsky A.F. Solomon D.I. Mathematical modeling of macroeconomic processes. Chisinau, Eureka, 1997, 268p. Gametskiy A.F. Solomon D.I. Matematicheskoye modelirovaniye makroekonomicheskikh protsessov. Kishineu, «Yevrika», 1997, 268s.
7. M.A. Gritsai. Brief notes on the stages of development of economics. Collection of works of the Laboratory of Electricity of the Institute of Energy. Issue 9, Chisinau, 2017. P.148-156. M.A. Gritsay. Kratkiye zametki ob etapakh razvitiya ekonomicheskoy nauki. Sbornik trudov Laboratorii upravlyayemykh elektroperedach Instituta energetiki. Vypusk 9, Kishinev, 2017. S.148-156.
8. Conturi Naţionale 2017. Biroul Naţional de Statistica al Republicii Moldova. Chişinău, 2018, 70 c.
9. Conturi Naţionale 2014. Biroul Naţional de Statistica al Republicii Moldova. Chişinău, 2015.
10. Conturi Internationale-2017, Anexa 10 Importul (c.i.f.) de bunuri pe principalele categorii de marfuri, p. 162-163, цены СИФ (2013-2017); diagram 19.
11. V. Postolati. The method of determining the limits of possible increase in tariffs for energy resources and other material costs in the sectors of the economy of the Republic of Moldova, based on the analysis of national accounts indicators. In: Problemele Energeticii Regionale nr. (32) 2016, p. 111-125.
12. G. Duca, V. Postolati, M. Tîrşu, M. Grodeţki, A. Stratan, T. Gutium. Un model nou de stabilire a tarifelor în Energetică, Economie şi servicii. Academos, nr. 2 (45), 2017, p. 36-42
13. Postolatiy V., Babich V. Tariff Policy in the Formation of the Price of Thermal Energy. Institute of Power Engineering, Chisinau, Republic of Moldova. Problemele Energeticii Regionale. 3(38) 2018, p. 169-180.
14. LAW of the Republic of Moldova Nr. 166 of July 11, 2012, on the approval of the Moldova 2020 national development strategy. [ZAKON Respubliki Moldova Nr. 166 ot 11.07.2012, ob utverzhdenii Natsional'noy strategii razvitiya «Moldova-2020».
15. BERZAN, V.; POSTOLATI, V.; BABICI, V.; BYCOVA, E. *The Estimation of the Technical and Financial Indicators of Exploitation Combined Heat and Power Plants with Variable Load*. Proceedings- 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017), Chişinău, Republic of Moldova October 11-13, 2017.-pp. 570-575. (Raportul ID 78,va fi inclus în SCOPUS).
16. BYKOVA E.V."Floating" threshold values for energy security indicators describing the tariffs of energy resources. *Energy System Researches, International scientific peer-reviewed journal.* Volume 1, № 2, 2018 Available online: http://esrj.ru/index.php/esr , ISSN 2618-9992, c.87-93.
17. THE NATIONAL REGULATORY AGENCY FOR REGULATORY ENERGY. DECISION NO. 429 of 21.11.2011 on the tariffs for the production of electric energy, thermal energy and delivery of thermal energy to final consumers.
18. Final report on the execution of the reorganization plan of Termocom SA. 2001 - December 2013. "ENI VECESLAV", IDNO 1011600029857, December 31, 2013, 1-69 pag. [Raportul final cu privire la executarea planului de reorganizarea SA “Termocom”. 2001 - decembrie 2013. ÎI ”ENI VECESLAV”, IDNO 1011600029857, 31 decembrie 2013, 1-69 pag.]
19. THE NATIONAL REGULATORY AGENCY FOR ENERGY REGULATION. DECISION NO. 109 of March 17, 2017, regarding the tariffs for thermal energy delivered to the consumers by S.A. "Termoelectrica".
20. THE NATIONAL REGULATORY AGENCY FOR ENERGY DECLARATION Nr. 232 of 16.09.2016 on the tariffs for thermal energy delivered to consumers by S.A. "Termoelectrica".

Сведения об авторе.

Постолатий Виталий Михайлович, доктор - хабилитат технических наук, академик Академии Наук Молдовы, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики Республики Молдова. Сфера научных интересов: большие системы энергетики, системные исследования,управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая и экологическая безопасность, экономика энергетики, электроэнергетика, теплоэнергетика, возобновляемые источники энергии.
E-mail: vpostolati@rambler.ru