ИНТЕГРАЛЬНАЯ МЕРА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Федорченко С.Г., Федорченко Г.С.
Приднестровский государственный Университет, г. Тирасполь

Аннотация. В статье предложен новый подход к формированию интегральной меры оценки энергобезопасности с использованием обобщенной функции полезности Харингтона-Менчера. Приведен пример построения такой меры на реальных данных. Приведено подробное описание функции Харингтона-Менчера. В процессе выполнения данной работы проведен анализ показателей, рекомендуемых в литературе как составляющие энергобезопасности. Показано, что значительная часть этих показателей тесно связана друг с другом.
Ключевые слова. Обобщенная функция полезности, корреляционные плеяды, индикаторный метод, энергобезопасность.

MĂSURABILĂ INTEGRALĂ DE EVALUARE A STĂRII SECURITĂŢII ENERGETICE

Fedorcenco S.G., Fedorcenco G.S.
Universitatea de Stat din Transnistria, or. Tiraspol

Rezumat. În articol se propune o abordare nouă faţă de formare a măsurabilei integrale de evaluare a securităţii energetice cu utilizare a funcţiei generalizată de utilitate Harington–Mencer. Este prezentat un exemplu de construire a acestei măsurabile pe baza de date reală. Se prezintă descriere detaliată a funcţiei Harington–Mencer. În procesul realizare a lucrării prezentate este efectuată analiza a indicatorilor, recomandaţi în literatura, ca componente ale securităţii energetice. Este demonstrat, că mare parte a acestor indicatorii este legată strâns unul cu altul.
Cuvinte-cheie: funcţie de utilitate generalizată, colelaţie galaxy, metodă de indicaţie, securitatea energetică.

INTEGRAL MEASURE OF EVALUATION OF THE STATUS OF ENERGY SECURITY

Fedorchenko S.G., Fedorchenko G.S.
State University of Transnistria, Tiraspol

Abstract. We present a new approach of creation of the integral measure of estimation of energy security using a generalized Harrington-Menchers's function. It is prezented an example of the construction of such a measure using real data. A detailed description of the Harrington-Menchers's function is presented. In carrying out this work the analysis of the indicators recommended in the literature as components of energy security is made. It is shown that a significant part of these indicators is closely linked with each other.
Keywords: Generalized utility function, galaxy correlation, a display method, energy security.

Введение

При решении задачи управления реальным объектом, необходимо, в качестве первого шага описать состояние объекта. Как правило, это описание содержит некий набор характеристик объектов, которые с некоторой точностью измеряются, тем или иным образом, или оцениваются экспертом. Таким образом, мы получаем набор величин, которые имеют различные единицы измерения, зачастую различную степень важности, но все они, по нашему мнению, характеризуют с разных сторон состояние объекта.

Для управления объектом крайне желательно свести весь этот массив данных к одному числу – некоторому интегральному показателю, который бы в полной мере (в соответствии с поставленной задачей управления) описывал состояние объекта.

Рассмотрим возможные подходы к решению этой задачи на примере оценки результатов мониторинга энергетической безопасности [1].

Описание общих принципов индикативного анализа

В основе индикативного анализа является формирование системы индикаторов, отражающих основные процессы в объекте исследования. Такими индикаторами могут быть:

- показатели состояния объекта;
- показатели функционирования объекта;
- показатели перспектив функционирования объекта.

Система индикаторов формируется на основе системного подхода и должна обеспечить:

- управление функционированием объекта;
- управление развитием объекта.

Система индикаторов может иметь подсистемы (блоки) которые в свою очередь также могут содержать некие подблоки и т.п., т.е система индикаторов может иметь иерархическую структуру.

Классификация состояний осуществляется по шкале кризисности, сформированной для каждого индикатора отдельно. Выделяют три состояния [1, с. 20], [2, с. 140]:

- нормальное:
- предкризисное;
- кризисное.

Для числового описания каждого из указанных состояний вводится некая шкала баллов, например:

- нормальное состояние (н) – 1 балл;
- предкризисное состояние (пк) – 2 балла;
- кризисное состояние (к) – 3 балла.

Границы состояний для каждого индикатора задаются отдельно. Пример 3-х бальной шкалы кризисности приведен на рис. 1.

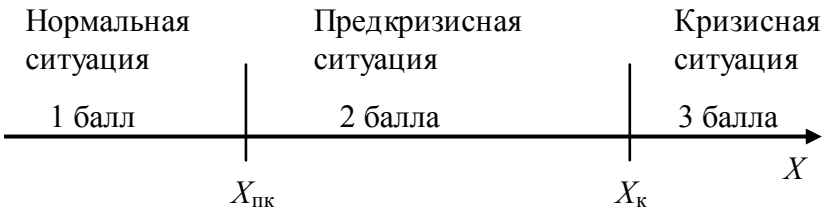


Рис. 1. Пример 3-х бальной шкалы кризисности для индикатора *X*.

Как видно из рис. 1, необходимости задать границы областей – величины $X_{пк}$ и $X_к$, например, с помощью экспертов.

В [1, с. 21] предлагается более детальное построение шкалы кризисности, при котором предкризисная ситуация разбивается на три зоны:

- предкризисное начальное -2 балла;
- предкризисное развивающееся- 3 балла;
- предкризисное критическое – 4 балла;

а критическая ситуация - на четыре зоны:

- кризисное нестабильное – 5 баллов;
- кризисное угрожающее – 6 баллов;
- кризисное критическое – 7 баллов;
- кризисное чрезвычайное – 8 баллов.

Пример 8-и бальной шкалы кризисности представлен на рис. 2.

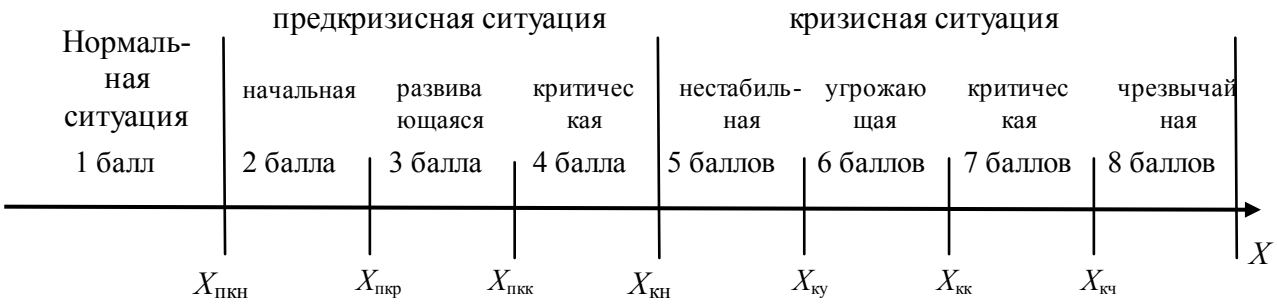


Рис. 2. Пример 8-и бальной шкалы кризисности для индикатора *X*.

После того, как для всех индикаторов построены шкалы кризисности, получены значения индикаторов, и найдены соответствующие значения баллов, рекомендуется найти среднее значение баллов для каждого блока (если все индикаторы одинаково важны) или средневзвешенное значение баллов (если важность индикаторов различна).

Выполнив эти действия для каждого блока индикаторов, мы можем найти среднее (или средневзвешенное) значение блочных индикаторов, в результате чего мы получим интегральный показатель, характеризующий состояние объекта управления, например, энергетического комплекса.

Виды интегральных показателей состояния объекта

Как упомянуто нами выше, чаще всего находят среднее или средневзвешенное количество баллов и используют полученное значение как показатель состояния объекта. Однако такой подход обладает рядом недостатков, главный из которых, по нашему мнению - его не универсальность. Рассмотрим два случая.

1. Негативное значение одного индикатора может быть скомпенсировано положительным значением другого, например неравномерность поставок топлива компенсируется имеющимися запасами топлива.
2. Негативное значение одного индикатора сводит на нет все сколь угодно благополучные значения других индикаторов, например, острая нехватка генерирующих мощностей сводит на нет наличие современной системы электроснабжения.

В первом случае мы можем абсолютно обоснованно строить привычный аддитивный интегральный показатель – например среднее арифметическое используемых индикаторов. Во втором случае нам необходимо использовать мультипликативный интегральный показатель, в процессе формирования которого мы используем произведение индикаторов.

Предлагается для построения мультипликативного интегрального показателя использовать обобщенную функцию полезности Харрингтона-Мечера [3, 4].

Данная функция предложена американским ученым Харрингтоном в 1965 году, который назвал ее функцией желательности (*desirability function*), ее еще называют «обобщенной функцией полезности» или «обобщенным критерием эффективности».

В основе построения этой обобщённой функции лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности. Назначение шкалы желательности – установление соответствия между физическими и психологическими параметрами. Здесь под физическими параметрами понимаются возможные отклики, характеризующие функционирование исследуемого объекта, а под психологическими параметрами понимаются чисто субъективные оценки экспериментатора желательности (предпочтительности) того или

иного значения отклика. Чтобы получить шкалу желательности, удобно пользоваться готовой разработанной таблицей, представленной ниже (табл. 1).

Таблица 1 – Связь между количественными значениями безразмерной шкалы и психологическим восприятием человека

Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень хорошо	1,00 – 0,80
Хорошо	0,80 – 0,63
Удовлетворительно	0,63 – 0,37
Плохо	0,37 – 0,20
Очень плохо	0,20 – 0,00

Значение частного отклика, переведённое в безразмерную шкалу желательности, обозначается через d_i (i=1, 2, …, n) и называется частной желательностью (от *desirable фр.* – желательный). Шкала желательности имеет интервал от нуля до единицы. Значение d_i=0 соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного свойства, а значение d_i=1 – самому лучшему значению свойства [3, 4].

Шкала Харрингтона является интервальной и относится к «сильным» шкалам, так как имеются определенные расстояния между отдельными числами на шкале.

В табл. 1 представлены числа, соответствующие некоторым точкам кривой, которая задаётся уравнением

$$d = \exp\left[-\exp\left(-y\right)\right] \tag{1}$$

На оси ординат нанесены значения желательности, изменяющиеся от 0 до 1. По оси абсцисс указаны значения отклика, записанные в условном масштабе. Выбор этой кривой не является единственной возможностью. Однако она возникла в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов и обладает такими полезными свойствами как непрерывность, монотонность, гладкость.

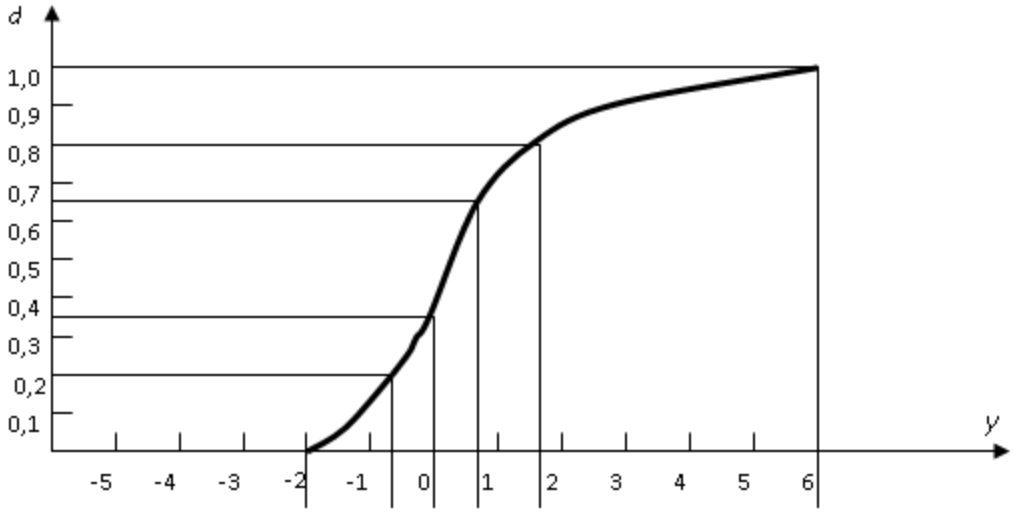


Рис. 3. Шкала и функция желательности Харрингтона

Такая кривая теоретически полностью выполняет функцию перевода откликов в безразмерный параметр, однако при практическом её использовании возникает ряд трудностей [3, 4].

Во-первых, параллельно кодированной шкале y необходимо размещать именованные шкалы откликов Y_1, Y_2, …, которые следует калибровать в точках, указанных в таблице 1, и эта калибровка происходит достаточно произвольно. При

этом почти всегда получается неравномерная шкала. Для получения величины d_{1j} необходимо найти точку конкретного числового значения Y_{1j} на шкале Y_1, а затем снести её на график функции и по оси ординат прочесть соответствующее значение d_{1j}. Естественно, точность такого преобразования будет невелика [4].

Во-вторых, жёсткость формулы (1) не позволяет использовать без дополнительных искажений отклики Y, распределённые по законам, отличным от нормального. Большие затруднения вызывают те отклики, качество которых сначала возрастает по мере возрастания их числовых значений, а затем после некоторой величины (или диапазона величин) начинает убывать [4].

В-третьих, предложенная Харрингтоном в качестве единого комплексного показателя качества продукции обобщённая функция желательности

$$D = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^{m} d_i}\ , \qquad (2)$$

где m – число единичных откликов – сравниваемых показателей качества продукции, обладает тем недостатком, что в ней все отклики признаются равновесными, хотя на практике это далеко не так.

Для устранения этих недостатков профессор Э.М. Менчер [3], предложил чисто аналитическую методику расчёта обобщённой функции желательности (показателя качества) с учётом всех перечисленных выше недостатков. Расчёт ведётся в два этапа.

На первом этапе определяются единичные значения функции d_i (i=1, 2, …, m) для каждого из откликов, каждый из них должен представлять непрерывную монотонную функцию. Для случая возрастания качества с возрастанием числовых значений отклика предложены 3 типа зависимостей (типы 1, 2 и 3 на рис. 4), а для случая убывания качества с возрастанием числовых значений отклика предложены ещё три типа зависимостей (типы 4, 5 и 6 на рис. 5.). При этом во всех случаях в качестве аргумента выступает отклик Y в своём натуральном виде – так, как он измерялся в ходе эксперимента, – большое достоинство для метода расчёта [4].

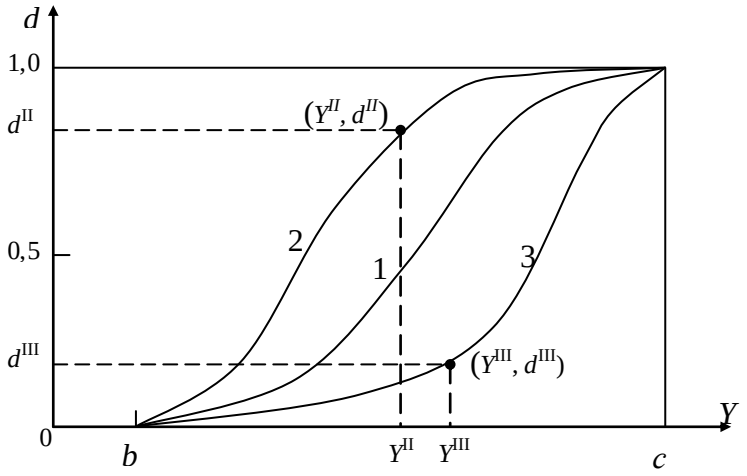


Рис. 4. Графики функций желательности трёх возрастающих типов

Рассмотрим три типа возрастающих кривых [3]. Для них необходимо знать начало b и конец c физического (или допустимого) значения отклика Y, то есть:

$$d = \begin{cases} 0, & \text{если } Y < b; \\ d, & \text{если } b \le Y \le c; \\ 1, & \text{если } Y > c. \end{cases} \tag{3}$$

В этом случае кривая *типа 1* является *S*-образной, возрастающей, симметричной и описывает качество отклика *Y*, если распределение *Y* не является резко асимметричным, по формуле

$$d = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{Y-b}{c-b}\right)^{1,927} - 2\right]\right\}\right\}. \tag{4}$$

Кривая типа 2 является *S*-образной, возрастающей, асимметричной с быстрым начальным возрастанием и рассчитывается по формуле

$$d = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{Y-b}{c-b}\right)^{a^{II}} - 2\right]\right\}\right\}, \tag{5}$$

где показатель степени a^{II} определяет скорость возрастания функции *d*. Для его расчёта необходимо знать хотя бы одну точку (Y^{II}; d^{II}) на искомом графике. Тогда величину a^{II} можно подсчитать по формуле

$$a^{II} = \frac{\ln\left(2 - \ln\ln\frac{1}{d^{II}}\right)}{\ln\left(Y^{II} - b\right) - \ln\left(c - b\right)}. \tag{6}$$

Аналогично, *кривая типа 3* является *S*-образной, возрастающей, асимметричной с медленным начальным возрастанием и рассчитывается по формуле

$$d = 1 - \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{\tilde{n} - Y}{c-b}\right)^{a^{III}} - 2\right]\right\}\right\}, \tag{7}$$

где показатель степени a^{III} можно найти по единственной точке (Y^{III}; d^{III}) по формуле

$$a^{III} = \frac{\ln\left(2 - \ln\ln\frac{1}{1-d^{III}}\right) - \ln 9}{\ln\left(c - Y^{III}\right) - \ln\left(c - b\right)}. \tag{8}$$

Рассмотрим три типа убывающих кривых [3]. Для их построения необходимо знать начало *e* и конец *f* физического (или допустимого) значения отклика *Y*, то есть:

$$d = \begin{cases} 1, \text{ если } & Y < e; \\ d, \text{если } & e \le Y \le f; \\ 0, \text{если } & Y < f. \end{cases} \tag{9}$$

Кривая типа 4 является *S*-образной, убывающей, симметричной, представляет собой зеркальный вариант кривой типа 1, и описывается формулой

$$d = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{f-Y}{f-e}\right)^{1,927} - 2\right]\right\}\right\}. \tag{10}$$

Кривая типа 5 является *S*-образной, убывающей, асимметричной, с быстрым начальным убыванием, представляет собой зеркальный вариант кривой типа 3, и описывается формулой

$$d = 1 - \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{Y-e}{f-e}\right)^{a^{V}} - 2\right]\right\}\right\}. \tag{11}$$

Здесь показатель степени a^V определяет скорость убывания функции d. Для расчёта необходимо знать хотя бы одну точку (Y^V; d^V) на искомом графике. Тогда величину a^V можно подсчитать по формуле

$$a^V = \frac{\ln\left(2 - \ln\ln\frac{1}{1-d^V}\right) - \ln 9}{\ln\left(Y^V - e\right) - \ln\left(f - e\right)}. \tag{12}$$

Аналогично, *кривая типа 6* является *S*-образной, убывающей, асимметричной, с медленным начальным убыванием, представляет собой зеркальный вариант кривой типа 2, и описывается формулой

$$d = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[9\left(\frac{f-Y}{f-e}\right)^{a^{VI}} - 2\right]\right\}\right\}, \tag{13}$$

где показатель степени a^{VI} можно найти по единственной точке (Y^{VI}; d^{VI}) по формуле

$$a^{VI} = \frac{\ln\left(2 - \ln\ln\frac{1}{1-d^{VI}}\right) - \ln 9}{\ln\left(f - Y^{VI}\right) - \ln\left(f - e\right)}. \tag{14}$$

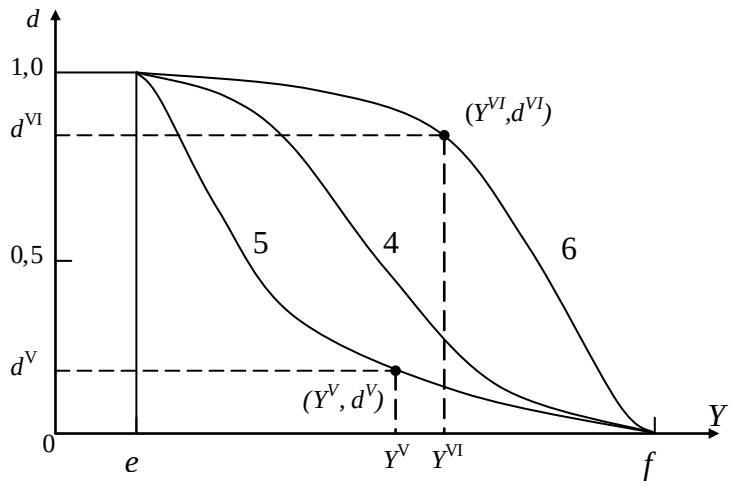


Рис. 5. Графики функций желательности трёх убывающих типов

Используя сочетания вышеперечисленных кривых, мы можем моделировать функции отклика, имеющие колоколообразный характер, симметричные, асимметричные, имеющие плато и без них (рис. 4). В этом случае оценка ведётся по каждой ветви комбинированной функции отдельно [3, 4].

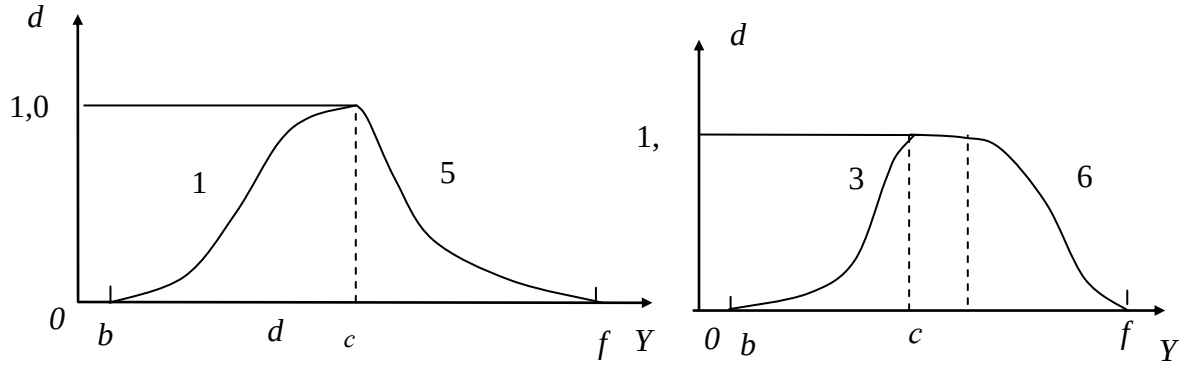


Рис. 6. Примеры комбинированных функций безразмерной оценки качества продукции по единому показателю

После определения величины d_i частных показателей качества всех i=1, 2,…, m откликов можно переходить ко второму этапу расчётов – определению обобщённой функции качества (полезности, желательности) D. Для нахождения значения D необходимо предварительно определить значения веса α_i для каждого частного показателя d_i. Как правило, веса находятся одним из экспертных методов (если нет нормативно заданных приоритетов). При этом наиболее важному отклику (или нескольким откликам) присваивается вес, равный единице, и далее с убыванием. Практика показала [4], что хотя теоретически веса могут быть любыми в диапазоне $0<\alpha_i\leq 1$, но эффективнее всего метод срабатывает при назначении весов в диапазоне $0{,}4\leq\alpha_i\leq 1{,}0$, при этом градация их должна быть не чаще 0,1, то есть в порядке убывания 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5 и 0,4.

Обобщённая функция желательности может быть найдена по формуле

$$D=\sqrt[\sum_{i=1}^{m}\alpha_i]{\prod_{i=1}^{m} d_i^{\alpha_i}}\ , \qquad (15)$$

где m – число частных оценок качества (число сравниваемых откликов); d_i – частный критерий отклика; α_i –вес – i-го частного критерия.

При использовании обобщенной функции полезности необходимо удовлетворить требованию - среди частных откликов не должно быть коррелированных между собой (в крайнем случае, допускается с оговорками пренебрежимо слабая корреляция). Для решения этой задачи рекомендуется использовать метод корреляционных плеяд [3, 4].

Построение мультипликативного интегрального показателя состояния объекта на примере задачи энергетической безопасности

Представим уровни энергетической безопасности, представленные на рис. 2 в виде табл. 2 и попытаемся состыковать их со значениями функции полезности, представленными в табл. 1. Результат представлен в табл. 3.

Таблица 2. – Состояния (уровни) энергетической безопасности

№ п/п	Название состояния	Кол-во баллов	Ситуация
1	Нормальное	1	Нормальная
2	Предкризисное начальное	2	Предкризисная
3	Предкризисное развивающееся	3	
4	Предкризисное критическое	4	
5	Кризисное нестабильное	5	Кризисная
6	Кризисное угрожающее	6	
7	Кризисное критическое	7	
8	Кризисное чрезвычайное	8	

Таблица 3. – Состояния (уровни) энергетической безопасности, состыкованные со значениями функции полезности

№ п/п	Название состояния	Кол-во баллов	Ситуация	Значения d-функции
1	Нормальное	1	Нормальная	1-0,63
2	Предкризисное начальное	2	Предкризисная	0,63-0,5
3	Предкризисное развивающееся	3		0,5-0,44
4	Предкризисное критическое	4		0,44-0,37
5	Кризисное нестабильное	5	Кризисная	0,37-0,31
6	Кризисное угрожающее	6		0,31-0,26
7	Кризисное критическое	7		0,26-0,2
8	Кризисное чрезвычайное	8		0,2-0

Прокомментируем это разбиение области существования d- функции:

1) нормальное состояние, совершенно очевидно соответствует значениям d-функции 1-0,63 («очень хорошо» и «хорошо»);
2) разобьем половину интервала 0,63-0,37 («удовлетворительно») на две равные части, первую из которых (0,63-0,5) отнесем к состоянию «предкризисное начальное»;
3) вторую половину интервала 0,63-0,37 (0,5-0,37) разделим еще на две равные части 0,5-0,44 и 0,44-0,37 которые отнесем к состояниям «Предкризисное развивающееся» и «Предкризисное критическое», соответственно;
4) область значений d-функции 0,37-0,2 («плохо») разделим на три равные области 0,37-0,31; 0,31-0,26; 0,26-0,2, которые отнесем к состояниям «Кризисное

нестабильное», «Кризисное угрожающее» и «Кризисное критическое», соответственно;

5) область значений *d*-функции 0,2-0 («очень плохо») отнесем к состоянию «Кризисное чрезвычайное».

Таким образом, алгоритм формирования интегрального показателя уровня энергетической безопасности выглядит следующим образом:

1. Формируется список показателей, характеризующих энергетическую безопасность.
2. Полученный список разбивается на группы, в каждой группе присутствуют показатели, значения которых взаимно компенсируют друг с друга (как со знаком плюс, так и со знаком минус) – для каждой группы формируется свой аддитивный интегральный показатель (среднее или средневзвешенное значение); ряд групп состоит из одного показателя, для них интегральный показатель не формируется.
3. С учетом п.2 формируется новый список показателей, куда вместо ряда групп показателей включается их интегральный аддитивный показатель.
4. Для показателей из нового списка необходимо сформировать интегральный мультипликативный показатель, с этой целью:

- с помощью метода корреляционных плеяд формируют список независимых показателей;
- по всему перечню независимых показателей формируют весовые коэффициенты;
- определяют по каждому независимому показателю границы уровней энергетической безопасности;
- вычисляют значения частных функций полезности;
- вычисляют значение обобщенной функции полезности.

Формирование интегральной оценки состояния энергетической безопасности

Рассмотрим пример реализации вышеизложенного алгоритма, используя данные, приведенные в [1].

Для построения мультипликативного интегрального показателя энергобезопасности необходимо удовлетворить требованию о том, что все факторы должны быть независимыми. Для проверки этого требования построим корреляционную матрицу (вычислим коэффициенты корреляции между всеми парными комбинациями факторов) и построим граф корреляционных плеяд, представленный на рис. 7. Для построения корреляционной матрицы были использованы данные, заимствованные из [1], представляющие собой значения вышеуказанных факторов за 13 лет. Для объема парной выборки равного 13 граница значимости коэффициента корреляции будет равна 0,56. Ниже этого значения мы не можем отличить истинное значение коэффициента корреляции от нуля.

Как видно из графа корреляционных плеяд (рис. 7) и списка факторов, разбитых по плеядам (табл. 5) общий список факторов разбивается на несколько групп (плеяд). Внутри каждой плеяды факторы тесно связаны между собой (в нашем случае величина коэффициента корреляции внутри каждой плеяды больше 0,56), связями между плеядами можно пренебречь.

Особенно много факторов сконцентрированы в первой плеяде, где оказалось 25 факторов, принадлежащих к блокам № 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, причем ряд факторов (X26, X33, X32, X76, X77, X78, X15, X13, X14, X16, X62, X22, X52, X01) характеризуются очень сильной связью (коэффициент корреляции $r>0.9$) то есть, связаны взаимно-однозначно

Таблица 4. Перечень факторов, характеризующих состояние энергобезопасности с разбивкой на блоки

Обозначение фактора	Название фактора
№ 1а. Блок топливообеспечения	
X01	Обеспеченность собственными топливными ресурсами по отношению к потребностям
X02	Обеспеченность топливом для производства тепло- и электроэнергии
X03	Обеспеченность топливом в коммунально-бытовом секторе
№ 1б. Блок топливопотребления	
X11	Уровень суммарного потребления топлива
X12	Доля доминирующего вида топлива в общей структуре
X13	Индикатор доли потребленного топлива для производства электро- и тепловой энергии в суммарном количестве потребленного топлива
X14	Индикатор удельного расхода топлива на производство электроэнергии
X15	Индикатор удельных расходов топлива на выработку тепловой энергии
X16	Индикатор доли потребленного топлива коммунально-бытовым сектором в общем суммарном потреблении топлива
№ 2. Блок производства электро- и тепловой энергии	
X21	Выработка электроэнергии
X22	Выработка тепловой энергии
X23	Доля собственных источников в покрытии баланса
X24	Доля маневренных мощностей (ГЭС) в общей установленной электрической мощности
X25	Доля блок–станций в общей установленной электрической мощности
X26	Доля мощности наиболее крупной электростанции в общей установленной электрической мощности
№ 3. Блок передачи и распределения электроэнергии	
X31	Уровень износа подстанций
X32	Уровень износа выключателей
X33	Уровень износа трансформаторов
X34	Обеспеченность трансформаторной мощностью на 1 кв. км территории страны, МВА/кв.км.
X35	Плотность электрических сетей на 1 кв. км. территории страны с учетом их длины и пропускной способности
№ 4. Блок импорта электроэнергии	
X41	Уровень резерва по межсистемным связям
X43	Доля импортируемой электроэнергии в общей потребляемой электроэнергии
№ 5. Блок экологический	
X51	Выбросы CO_2 на единицу сожженного топлива
X52	Выбросы CO2 на душу населения
№ 6. Блок потребителей	
X61	Потребление электроэнергии
X62	Потребление тепловой энергии
X63	Доля среднедушевого дохода населения, затраченного на оплату энергоресурсов
№ 7. Блок экономический	
X75	Тариф на электроэнергию
X76	Тариф на тепловую энергию
X77	Тариф на природный газ
X78	Энергоемкость ВВП
X79	Электроемкость ВВП
№ 8. Блок инвестиций	
X81	Доля мощности вводимых объектов в общей установленной мощности
X82	Объем годовых инвестиций в ТЭК

Таблица 5. Список факторов с разбивкой по плеядам

Плеяда 1	
X01	Обеспеченность собственными топливными ресурсами по отношению к потребностям
X02	Обеспеченность топливом для производства тепло- и электроэнергии
X11	Уровень суммарного потребления топлива
X12	Доля доминирующего вида топлива в общей структуре
X13	Индикатор доли потребленного топлива для производства электро- и теплоэнергии в суммарном количестве потребленного топлива
X14	Индикатор удельного расхода топлива на производство электроэнергии
X15	Индикатор удельных расходов топлива на выработку теплоэнергии
X16	Индикатор доли потребленного топлива коммунально-бытовым сектором в общем суммарном потреблении топлива
X22	Выработка тепловой энергии
X23	Доля собственных источников в покрытии баланса
X25	Доля блок–станций в общей установленной электрической мощности
X26	Доля мощности наиболее крупной электростанции в общей установленной электрической мощности
X31	Уровень износа подстанций
X32	Уровень износа выключателей
X33	Уровень износа трансформаторов
X35	Плотность электрических сетей на 1 кв. км. территории страны с учетом их длины и пропускной способности
X41	Уровень резерва по межсистемным связям
X52	Выбросы CO2 на душу населения
X62	Потребление тепловой энергии
X63	Доля среднедушевого дохода населения, затраченного на оплату энергоресурсов
X75	Тариф на электроэнергию
X76	Тариф на тепловую энергию
X77	Тариф на природный газ
X78	Энергоемкость ВВП
X79	Электроемкость ВВП
Плеяда 2	
X43	Доля импортируемой электроэнергии в общей потребляемой электроэнергии
Плеяда 3	
X51	Выбросы CO_2 на единицу сожженного топлива
Плеяда 4	
X61	Потребление электроэнергии
Плеяда 5	
X03	Обеспеченность топливом в коммунально-бытовом секторе
X81	Доля мощности вводимых объектов в общей установленной мощности
Плеяда 6	
X34	Обеспеченность трансформаторной мощностью на 1 кв. км территории страны, МВА/кв.км.
Плеяда 7	
X21	Выработка электроэнергии
Плеяда 8	
X82	Объем годовых инвестиций в ТЭК
Плеяда 9	
X24	Доля маневренных мощностей (ГЭС) в общей установленной электрической мощности

V плеяда содержит 2 фактора – X81, X03, в остальных 7 плеядах - по одному фактору. Таким образом, вместо 25 факторов, принадлежащих плеяде номер 1 можно использовать один фактор-представитель плеяды, например фактор X79 (электроемкость ВВП), а остальные факторы, попавшие в эту плеяду, не рассматривать.

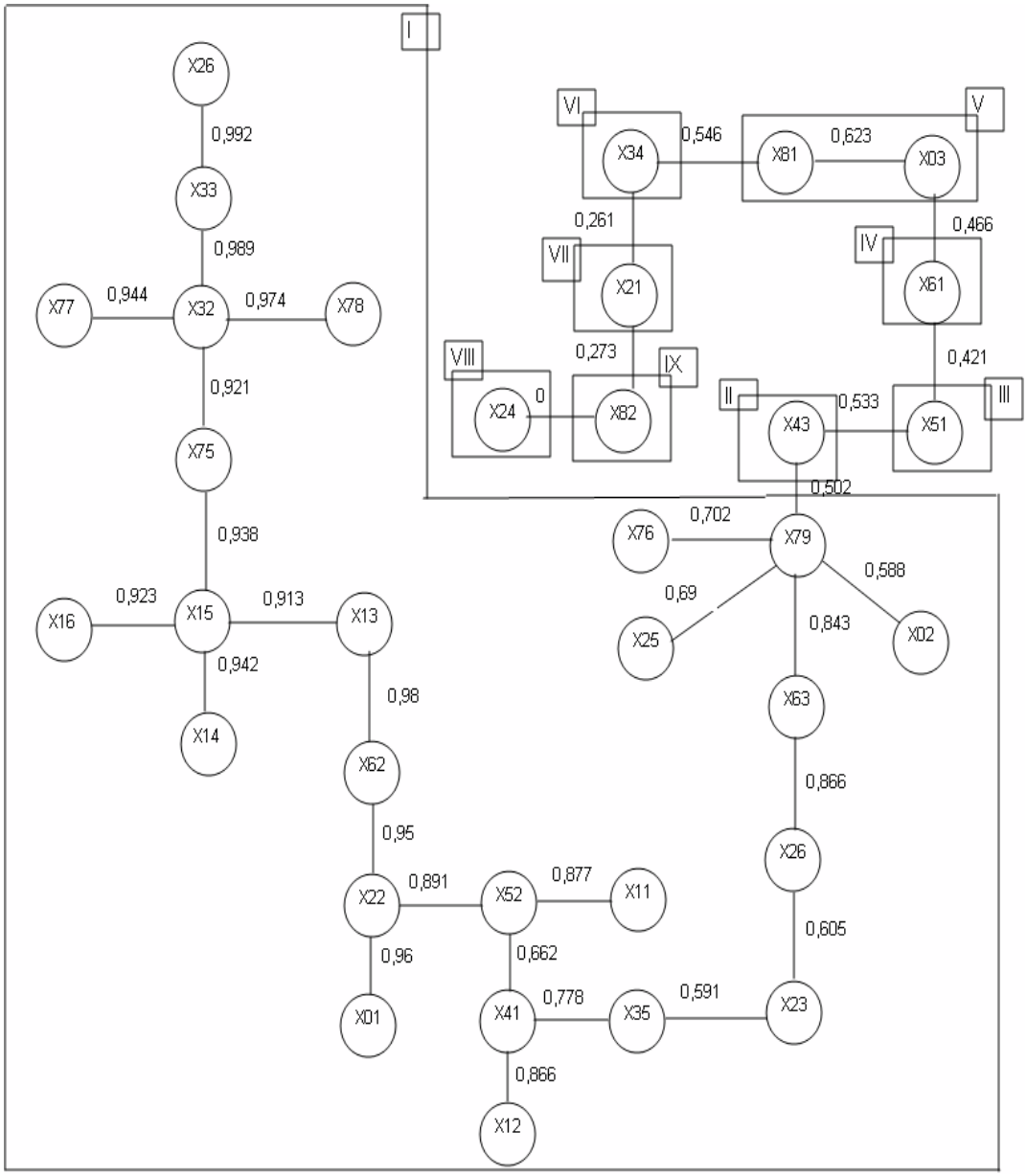


Рис. 7. – Граф корреляционных плеяд.

Общий список из 40 факторов может быть уменьшен до представителей каждой плеяды, всего 9 факторов, а именно: X79, X43, X51, X61, X03, X34, X21, X82, X24. Мы получили список факторов, взаимные связи между которыми можно признать незначимыми, а, следовательно, опираясь на них, мы можем сформировать интегральную меру энергобезопасности.

Рассмотрим процесс перехода от именованной величины к значению частной функции полезности d_{03} для фактора X03 (обеспеченность топливом в коммунально-бытовом секторе).

Для вычисления значения индикатора воспользуемся формулой, заимствованной из [1]:

*X03= Тсобств ком-быт/ Тпотребляемое ком-быт*100 %* (16)

Выберем 2-й тип кривой, и используем для расчетов d_{03} формулы (5, 6). Результаты вычислений представлены в табл. 6, 7.

Таблица 6. Данные для расчета значения d_{03}

Пороговые значения			значение показателя степени a^{II}
базовое	предкризисное	кризисное	
100%	70%	50%	1.638344

Результаты расчетов для остальных факторов сведены в табл. 7.

Таблица 7. – Результаты расчета значений частных функций полезности для различных индикаторов за 1995-2007 гг.

год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
X03	11%	11%	11%	12%	13%	14%	10%	12%	10%	10%	10%	14%	15%
d_{03}	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*	*0,01*
X21	100%	93%	111%	116%	139%	123%	78%	108%	101%	90%	87%	96%	94%
d_{21}	*0,999*	*0,995*	*1*	*1*	*1*	*1*	*0,805*	*1,000*	*1,000*	*0,986*	*0,975*	*0,998*	*0,995*
X24	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
d_{24}	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*
X34	100%	97%	94%	86%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
d_{34}	*0,999*	*0,989*	*0,917*	*0,025*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*
X43	15%	53%	42%	51%	51%	42%	53%	20%	28%	49%	53%	43%	74%
d_{43}	*0,952*	*0,010*	*0,009*	*0,010*	*0,010*	*0,009*	*0,010*	*0,861*	*0,492*	*0,001*	*0,010*	*0,006*	*0,010*
X51	100%	100%	100%	100%	100%	89%	83%	83%	89%	89%	89%	89%	89%
d_{51}	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*0,999*	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*
X61	100%	95%	94%	86%	94%	95%	84%	85%	87%	89%	86%	92%	97%
d_{61}	*0,999*	*0,996*	*0,995*	*0,971*	*0,996*	*0,996*	*0,953*	*0,963*	*0,977*	*0,985*	*0,971*	*0,993*	*0,998*
X79	2,63	2,21	1,82	2,21	2,31	3,23	2,62	2,11	1,8	1,33	1,23	1,15	
d_{79}	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,001*	*0,651*	*0,906*	*0,977*	
X82	18%	23%	27%	22%	22%	15%	27%	18%	19%	37%	41%	61%	0%
d_{82}	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,010*	*0,005*	*0,010*

Анализируя табл. 7, мы видим, что значения большей части представленных в ней индикаторов стабильны (стабильно низкие или стабильно высокие), существенно изменяются только значения индикаторов X34, X43, X79 – именно они будут вызывать изменения величины интегрального показателя.

Для вычисления интегрального показателя качества нам необходимо знать весовые коэффициенты для каждого индикатора, представленного в табл. 7. После опроса специалистов, нами были получены значения весов, представленные в табл. 8.

Результаты, полученные при вычислении интегрального показателя уровня энергобезопасности, представлены в табл. 9.

Таблица 8. – Значения весов для индикаторов из табл. 7

№ п/п	Индикато	Смысл индикатора	Вес

	p		
1	X03	Обеспеченность топливом в коммунально-бытовом секторе	0,6
2	X21	Выработка электроэнергии	0,9
3	X24	Доля маневренных мощностей (ГЭС) в общей установленной электрической мощности	0,2
4	X34	Обеспеченность трансформаторной мощностью на 1 кв. км территории страны, МВА/кв.км.	0,8
5	X43	Доля импортируемой электроэнергии в общей потребляемой электроэнергии	0,6
6	X51	Выбросы CO2 на единицу сожженного топлива	0,1
7	X61	Потребление электроэнергии	0,9
8	X79	Электроемкость ВВП	0,8
9	X82	Объем годовых инвестиций в ТЭК	0,7

Таблица 9. Значения интегрального показателя энергобезопасности по годам

d_i	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
d03	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
d21	0,999	0,995	1,000	1,000	1,000	1,000	0,805	1,000	1,000	0,986	0,975	0,998	0,995
d24	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
d34	0,999	0,989	0,917	0,025	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
d43	0,952	0,010	0,009	0,010	0,010	0,009	0,010	0,861	0,492	0,001	0,010	0,006	0,010
d51	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
d61	0,999	0,996	0,995	0,971	0,996	0,996	0,953	0,963	0,977	0,985	0,971	0,993	0,998
d79	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,001	0,651	0,906	0,977	0,910
d82	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,005	0,010
D	**0,151**	**0,151**	**0,151**	**0,150**	**0,151**	**0,151**	**0,145**	**0,150**	**0,101**	**0,273**	**0,285**	**0,265**	**0,287**

Как видно из представленных расчетов, уровень энергобезопасности, за рассматриваемые годы, изменяется от состояния «очень плохо» в 1995-2003 гг, достигая своего минимального значения в 2003 г., до «плохо», достигая своего максимального значения в 2007 г.

Заключение

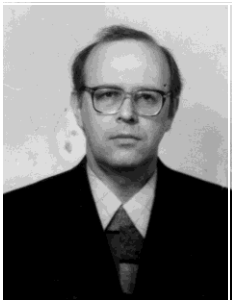
Представленная методика позволяет:

- сформировать интегральный показатель энергобезопасности государства, региона и т.п.;
- в процессе реализации данной методики необходимо строить список индикаторов, значения которых слабо зависят друг от друга;
- данный список, по нашему мнению не является стабильным, следовательно, его необходимо регулярно обновлять;
- получаемое в результате расчетов значение интегрального показателя зависит от использованных весовых коэффициентов, следовательно, необходимо очень тщательно отнестись к их формированию.

Литература

[1] Методические подходы к решению проблемы энергетической безопасности Молдовы и Белоруси / Быкова Е.В., Михайлевич А.А., Постолатий В.М. и др.; Акад наук Молдовы, Ин-т энергетики, Нац. Акад. Наук Белоруси и др. – К.:Б. и., 2010 (Tipogr. ASM). – 100 p.
[2] В. В. Бушуев, Н. И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю. К. Шафраник и др. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1998, 302 с.
[3] Обобщенная функция полезности и ее приложения. /Авт.: С.Г. Федорченко, Ю.А. Долгов, А.В. Кирсанова, Э.М. Менчер, С.В. Помян, М.В. Нижегородова, Е.И. Андрианова, Н.В. Колоскова, А.В. Колегов, А.М. Башкатов. /Под ред. С.Г. Федорченко. – Тирасполь: Изд-во Приднестр. университета, 2011. – 196с. – (в обл.) ISBN 978-9975-4062-3-9/
[4] Долгов Ю.А. Статистическое моделирование. – Тирасполь: РИО ПГУ, 2002. – 280с.

Сведения об авторах.



Федорченко Сергей Григорьевич, к.т.н., доц. Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь (fed_tir@mail.ru). Область научных интересов – методы обработки результатов пассивного эксперимента.

Федорченко Григорий Сергеевич - аспирант, Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь.

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАДИЦИОННОГО РЕДУКТОРНОГО ПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА С ДВУХСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Бойко А.О.
Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. В статье предложена методика математического описания и исследования двухскоростного асинхронного электропривода пассажирского лифта. Уделено внимание описанию нелинейных параметров асинхронного электрического двигателя и детальному анализу его энергетики. Приведена математическая модель и описаны ее элементы. Представлены результаты исследования качества электромеханического преобразования энергии в механизме подъема пассажирского лифта с двухскоростным асинхронным двигателем методом математического моделирования. При исследованиях учтены переменные параметры схемы замещения при работе двигателя на высокой и на низкой скоростях, переменное значение коэффициента полезного действия червячного редуктора, параметры загрузки кабины, направление и реальная структура цикла движения лифта по оптимальной диаграмме. Результаты моделирования проверены и подтверждены экспериментально на действующем пассажирском лифте.
Ключевые слова: Пассажирский лифт, редуктор, двухскоростной асинхронный электрический двигатель, КПД, моделирование, энергетические показатели

ANALIZA PARAMETRILOR ENERGETICE ALE ASCENSORULUI DE PERSOANE TIPIC CU MOTORUL ASINCRON CU DOUĂ VITEZE ŞI CU MECANISMUL DE RIDICARE CU REDUCTOR

Boico A.O.
Universitatea Naţională Politehnică din Odesa

Rezumat. În lucrarea se propune o metodă de descriere matematică şi de studiu ascensorului de pasageri cu moroul asincron cu două viteze. A acordat o atenţie la descrierea parametrilor neliniare ale motorului electric asincron şi o analiză detaliată a performanţei energetice. Este prezentat modelul matematic şi sunt descrise elementele ei şi rezultatele studiilor de cercetare de calitate a conversiei electromecanice a energiei în mecanismul ridicării ascensorului cu motorul asincron cu două viteze prin modelare matematică. La cercetări sunt studiate parametri variabile a schemei. Sunt prezentate rezultatele cercetării calităţii transformării electromecanice a energiei în mecanismul de ridicat al ascensorului de persoane cu motorul electric asinhron cu două viteze prin metodă de modelare matematică. La cercetări este studiată influenţă a parametrii variabili ai schemei echivalente a motorului la lucru la vitezele înaltă şi joasă, valoarea variabilă a randamentului reductorului cu melc, parametrilor de încărcare a cabinei, direcţie şi structura reală a ciclului de mişcare a acsensorului la diagrama optimală. Rezultatele modelării sunt verificate experimental la ascensor de persoane.
Cuvinte-cheie: Ascensor de persoane, reductor, motor electric asicncron cu două viteze, randamentul, modelare, indicii energetice.

ANALYSIS OF ENERGETIC INDICES OF TRADITIONAL GEARED ELEVATING MECHANISM WITH TWO-SPEED ASYNCHRONOUS MOTOR FOR PASSENGER LIFTS

Boyko A.
Odessa National Polytechnic University

Abstract. In article the technique of the mathematical description and researches of the two- speed asynchronous electric drive for the passenger lift of a traditional design is offered. The mathematical model is presented and its elements are described. The attention is paid to nonlinearities of the two-speed asynchronous electric drive and to detailed analysis of its energetic indices. The results of research of electromechanical transformation in the mechanism of the passenger lift with the two - speed asynchronous motor by a method of mathematical modeling are submitted. At researches are taken into account: variable parameters of an equivalent circuit of the asynchronous motor at work on high and low speeds, variable value of a worm gear reducer efficiency, load of a

cabin, direction and real structure of a motion cycle of the lift, which moved under the optimum diagram. The results of modeling are checked up and are confirmed experimentally on the working passenger lift.
Keywords: Passenger lift, reducer, two-speed asynchronous electric drive, efficiency, modeling, energetic parameters.

Введение.

Главными технико-экономическими показателями при обосновании технических решений различных систем лифтовых электроприводов - это способность обеспечить оптимальные комфортные условия перевозки пассажиров, энергетическая эффективность и массогабаритные показатели [1]. Современным и актуальным направлением развития электромеханики является переход от неуправляемых автоматизированных систем к управляемым, которые обеспечивают значительное улучшение динамических и энергетических показателей электропривода и механизма. В области пассажирских лифтов - это замена неуправляемых асинхронных электроприводов с двухскоростными двигателями на частотно управляемые электропривода с односкоростными двигателями, а также внедрение безредукторных лебедок с тихоходными приводными двигателями [2,3]. Тем не менее, изучение традиционных лифтовых электроприводов с двухскоростными асинхронными двигателями (АД) и червячными редукторами, не потеряли актуальности, ввиду массовости их применения (в Украине на 2013 год более 400 тыс.). Анализ их показателей необходим для поиска путей модернизации, а так же для расчета технико - экономической эффективности других альтернативных вариантов электроприводов, при этом традиционная лифтовая электромеханическая система используется в качестве базовой [2,4].

В настоящей работе рассмотрены энергетические диаграммы для некоторых режимов работы традиционной электромеханической системы пассажирского лифта, рассчитанные с использованием математических моделей асинхронной электрической машины с переменными параметрами и механической передачи с переменным значением коэффициента полезного действия (КПД), зависящего от текущей загрузки подъемного механизма. При моделировании детально учитывались параметры механической и электрической частей лифта, а так же реальная структура цикла работы от начала движения до наложения электромагнитного тормоза. Моделирование процессов выполнено с применением библиотеки «Simulink» среды «Matlab». Результаты моделирования проверены и подтверждены экспериментально на действующем пассажирском лифте [5]. Основными параметрами, характеризующие электромеханическую систему, приняты:

Общая характеристика лифта. Пассажирский лифт, установлен в 10-ти этажном здании с высотой этажа 3,2 м, номинальная скорость 1м/с, грузоподъемность 500 кг, масса кабины 1250 кг, масса противовеса 1500 кг.

Механическая передача. Червячный глобоидный редуктор РГЛ-180-47. Передаточное число 47, номинальная исходная мощность 5 кВт, номинальный ККД 63%, диаметр канатоведущего шкива 0,93 м, четыре ветви тяговых канатов диаметром 12 мм.

Приводной двигатель. Асинхронный двухскоростной АСС 92-6/24; мощность 7,1/1,8 кВт; номинальная скорость 975/205 об/мин; номинальный ток 17,1/16,3 А; КПД 0,85/0,42; коэффициент мощности 0,85/0,4. Между редуктором и приводным двигателем установлен электромагнитный тормоз с моментом 100 Нм.

Моделирование асинхронного двигателя выполняется на основе известной теории обобщенной машины в неподвижных координатах α,β,0 [6].

Уравнения питающего напряжения, записываются

$$U_{1\alpha} = U_{1m}\cos(\omega_0 t)$$
$$U_{1\beta} = U_{1m}\sin(\omega_0 t) \qquad (1)$$

Уравнение равновесия напряжений статора и ротора

$$U_{1\alpha} = i_{1\alpha}R_1 + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt},$$
$$U_{1\beta} = i_{1\beta}R_1 + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt},$$
$$0 = i_{2\alpha}R_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega\psi_{2\beta}, \qquad (2)$$
$$0 = i_{2\beta}R_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} + \omega\psi_{2\alpha}.$$

Уравнение потокосцеплений

$$\psi_{1\alpha} = i_{1\alpha}\frac{x_s}{\omega_0} + i_{2\alpha}\frac{x_0}{\omega_0},$$
$$\psi_{1\beta} = i_{1\beta}\frac{x_s}{\omega_0} + i_{2\beta}\frac{x_0}{\omega_0},$$
$$\psi_{2\alpha} = i_{2\alpha}\frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\alpha}\frac{x_0}{\omega_0}, \qquad (3)$$
$$\psi_{2\beta} = i_{2\beta}\frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\beta}\frac{x_0}{\omega_0},$$

Электромагнитный момент

$$M = \frac{3}{2}p\frac{x_0}{\omega_0}(i_{2\alpha}i_{1\beta} - i_{1\alpha}i_{2\beta}) \qquad (4)$$

Уравнение движения

$$M - M_c = J_\Sigma\frac{d\omega_2}{dt}\frac{1}{p} \qquad (5)$$

В уравнениях (1) - (5) : ω_0, ω, ω_2 угловые скорости, электромагнитного поля, электрическая ротора, механическая ротора, соответственно; $x_s = x_1 + x_0$ - полное индуктивное сопротивление статора, $x_r = x'_2 + x_0$ - полное индуктивное сопротивление ротора, p - число пар полюсов АД.

На рис. 1 представлена схема базовой модели асинхронного двигателя согласно приведенным уравнениям. Все переменные параметры, выбранные в качестве расчетных, обозначены дополнительным индексом "r". Дополнительно в модель

введены блоки измерения и блоки, реализующие нелинейности параметров АД: X_0 – индуктивного сопротивления контура намагничивания, как функции тока намагничивания; X_1; X_2 – индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора, как функции тока статора; R_2 – активного сопротивления ротора, как функции скольжения.

При настройке блоков нелинейностей необходимо учитывать, что при работе модели, с большей степенью вероятности, реализуется, так называемая, "алгебраическая петля", когда числовое решение системы дифференциальных уравнений невозможно [7]. Для недопущения этого явления, в контуры, которые моделируют нелинейности АД, вводятся блоки задержки сигналов «Transport Delau» с шагом задержки, согласно шагу интегрирования [5].

При моделировании двухскоростного двигателя моделируются одновременно и независимо две модели, аналогичные изображенной на рис. 1, с параметрами, соответствующими каждой из обмоток АД. Упрощенная блок-схема модели двухскоростного асинхронного электропривода показана на рис. 2.

Блок «Source U» является источником напряжения для каждой из обмоток АД, которые в модели представлены блоками «Subsystem 1» и «Subsystem 2» (рис. 1). Входы «In1» этих блоков - управляющие. Поскольку между обмотками высокой и низкой скорости нет электромагнитной связи, то управление отдельными обмотками можно свести к разрешению или запрету работы интеграторов, которые реализуют решение уравнения (2). При отсутствии сигнала на входе соответствующего интегратора, он начинает работу. При поступлении на этот вход напряжения управления, например 10 В, интегратор перестает работать, а на его выходе устанавливаются нулевые начальные условия. Управление обмотками двигателя выполняется в функции перемещения кабины лифта (сигнал h_k блока «From 30») с помощью блоков «Relay1» - «Relay3». В начале работы существует разрешение на интегрирование уравнений (3) для обмотки высокой скорости, и запрет работы обмотки низкой скорости. Воспроизводится процесс пуска и работы в установившемся режиме. При подходе кабины к заданному этажу на расстояние от 1 до 1,5 м отключается обмотка высокой скорости и, с выдержкой времени на переключение контакторов, включается обмотка низкой скорости. При этом моделируется режим динамического торможения и работы на пониженной скорости. При подходе кабины на расстояние 0,1 – 0,2 м обмотка низкой скорости отключается и на вал двигателя накладывается электромагнитный тормоз. Момент электромагнитного тормоза «Memt» моделируется как момент реактивного характера. Моменты двигателя от обмоток большой скорости «Mhs» и малой скорости «Mls» подаются на вход блока «Speed», который моделирует механизм подъема лифта. На выходе этого блока формируются механическая скорость и ее производная, а также электрические скорости для моделей высокой и низкой скоростей АД.

На рис. 3 представлена осциллограмма процесса перемещения кабины с номинальным грузом при подъеме на один этаж [8]. На осциллограмме показаны: фазные токи обмоток высокой и низкой скорости, (а); моменты и скорость двигателя (б); путь, скорость и ускорения кабины (в). Управление изменением режимов выполняется в функции пути. Переключение на обмотку низкой скорости происходит за 1 м до места остановки, отключение двигателя и наложение электромагнитного тормоза за 0,1 м до места остановки.

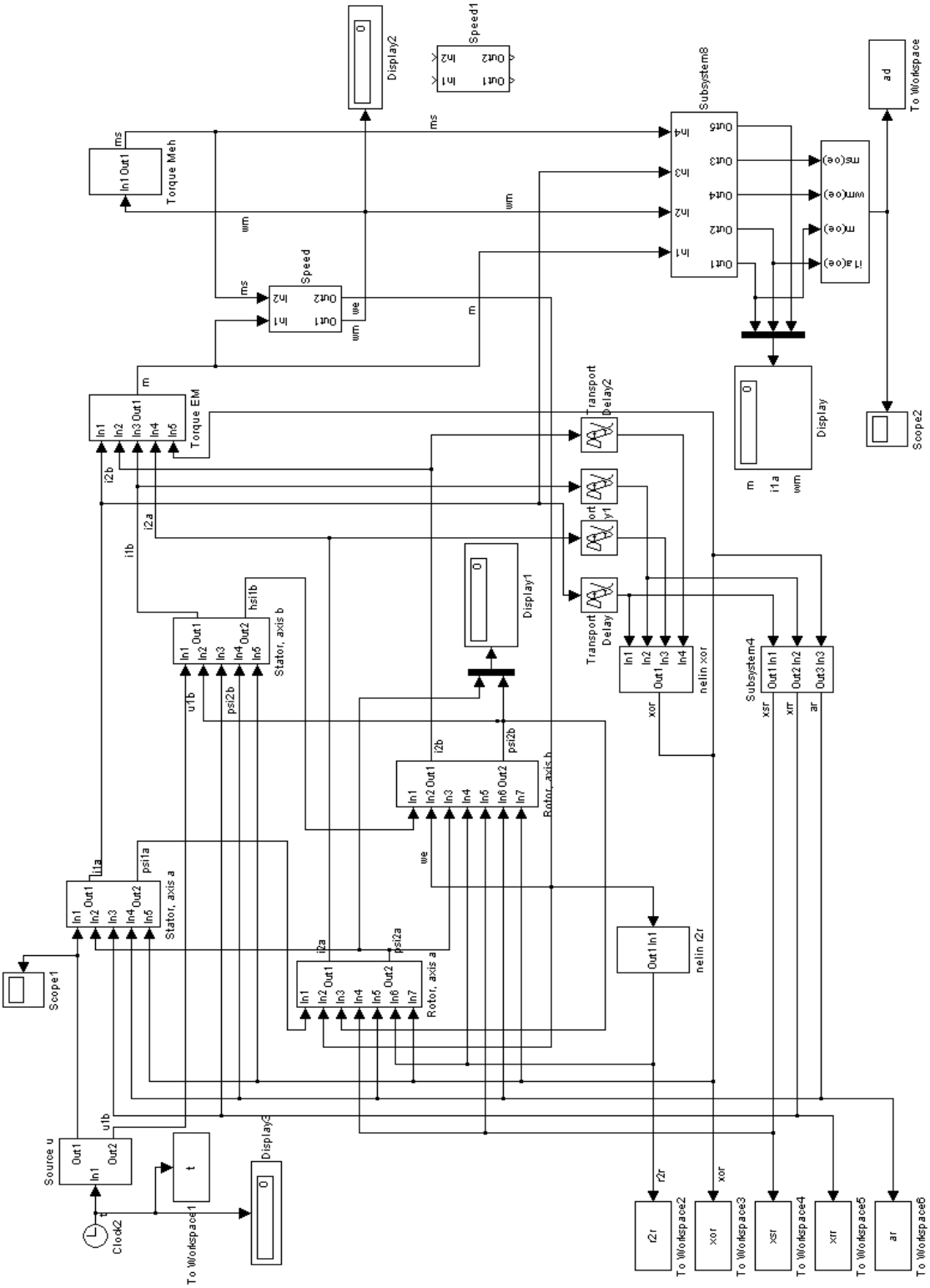


Рис. 1. Схема модели асинхронного двигателя

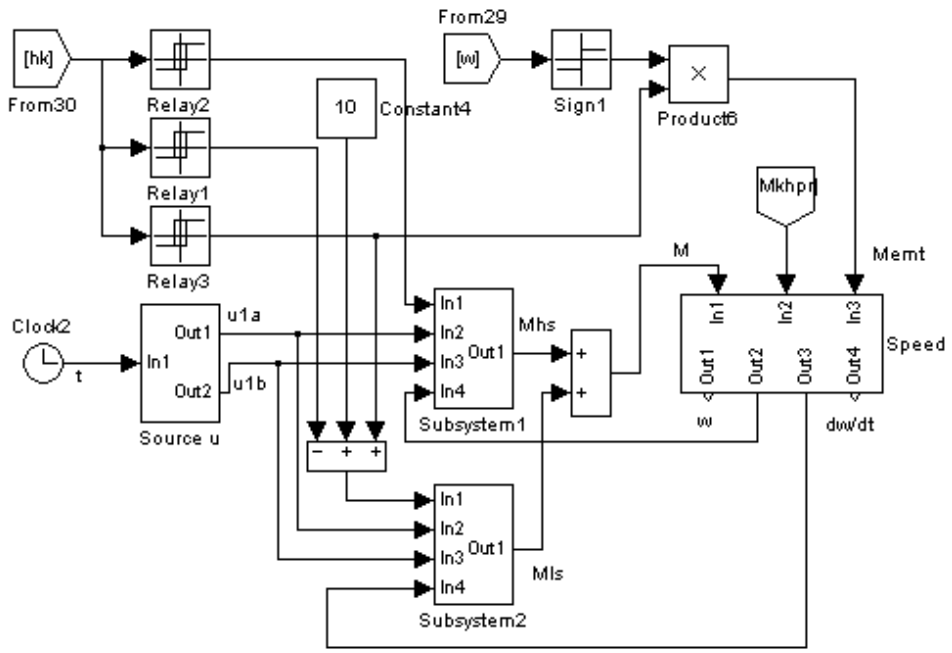


Рис. 2. Упрощенная схема модели двухскоростного асинхронного электропривода пассажирского лифта

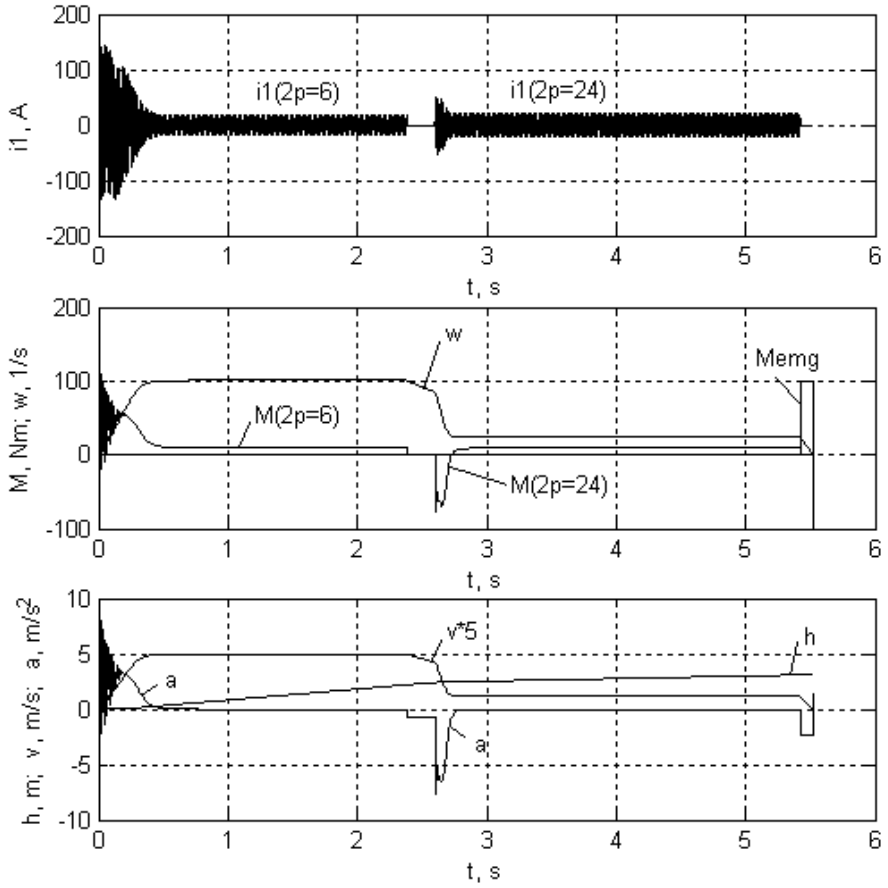


Рис. 3. Осциллограмма процесса перемещения кабины с номинальным грузом на один этаж

Для анализа энергетических показателей проводилось измерение мгновенных мощностей и интегралов мощностей, что позволило проводить детальное исследование энергетической эффективности, как лифта в целом, так и его отдельных составляющих [9].

Механические величины:

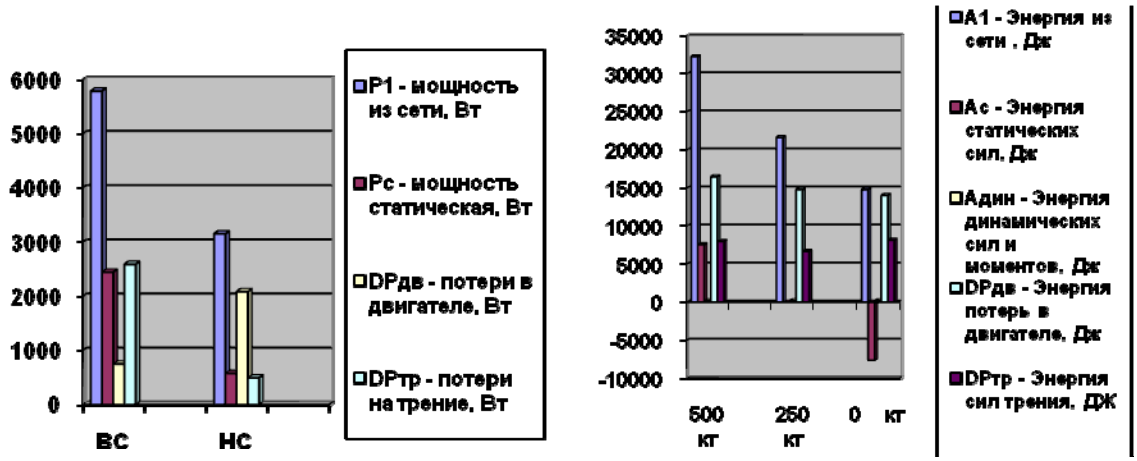
- мощность на валу приводного двигателя $P = M \cdot \omega$, а также ее составляющие:
- полезная мощность на валу канатоведущего шкива, определяемая статическим моментом нагрузки $P_c = M_c \cdot \omega_{кш}$;
- мощность, определяемая динамическими моментами элементов механизма подъема, движущихся поступательно (кабина, противовес, груз) $Ð_{äèí\ ê,ï,ã} = Ì_{äèí\ ê,ï,ã} \cdot \omega_{êø}$;
- мощность, определяемая динамическими моментами элементов механизма подъема, движущихся вращательно (ротор двигателя, редуктор, шкив электромагнитного тормоза) $Ð_{äèí\ äâ,ðåä,ýì\ ã} = Ì_{äèí\ äâ,ðåä,ýì\ ã} \cdot \omega$;
- потери мощности на трение в механизме подъема, приведенные к валу канатоведущего шкива $\Delta P_{тр} = M_{тр} \cdot \omega_{кш}$. В общем моменте трения учтены постоянные силы трения кабины и направляющих, постоянная и переменная составляющие потерь в редукторе.

Электрические величины:

- активная мощность, потребляемая из сети $P_1 = \frac{3}{2}\left(u_{1\alpha} i_{1\alpha} + u_{1\beta} i_{1\beta}\right)$, а также ее составляющие:
- потери мощности в обмотках высокой и низкой скорости статора $\Delta P_{м1} = \frac{3}{2}\left(i^2_{1\alpha} + i^2_{1\beta}\right) \cdot R_1$ и ротора $\Delta P_{м2} = \frac{3}{2}\left(i^2_{2\alpha} + i^2_{2\beta}\right) \cdot R_2$;

потери мощности в стали $\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст\,н} \cdot \frac{I_0^2}{I_{0н}^2}$, где $\Delta P_{ст\,н}$ - номинальные потери в стали, $I_0^2; I_{0н}^2$ - квадраты амплитуд текущего тока намагничивания и тока намагничивания в номинальном режиме.

Энергетические диаграммы электромеханической системы пассажирского лифта при номинальной массе груза и за поездку на один этаж при разной загруженности кабины представлены на рис. 4.



а) б)

Рис. 4. Энергетические диаграммы электромеханической системы лифта в установившемся (а) и в динамических (б) режимах

В установившемся режиме работы, рис. 4,а большую часть потребляемой мощности составляют потери в приводном двигателе и на трение. Причем потери на трение на низкой скорости уменьшаются, в сравнении с потерями на высокой скорости, а потери в двигателе, несмотря на уменьшение механической мощности, значительно возрастают. Принимая во внимание достаточную продолжительность участка работы на пониженной скорости, эти потери отрицательно влияют на общую энергетическую эффективность подъемного механизма. Благодаря значительным потерям в двигателе и на трение, ни в одном из установившихся режимов работы не наступает длительный режим генерации электрической энергии, в противоречие существующим представлениям [1,11]. Уточненные величины КПД исследуемой электромеханической лифтовой системы, оказались ниже декларируемых (значения в скобках) [10]. Так, для режима подъема номинального груза, КПД составил не более 42,4% (61%), а для случая пуска - 8,2% (16%).

Обобщенная картина энергетической эффективности представлена для цикла подъема кабины на один этаж при трех значениях загрузки: 500 кг; 250 кг и пустой кабины, рис. 4,б. Следует обратить внимание на то, что существует незначительный по продолжительности и величине участок генерирования энергии в сеть, при переходе на пониженную скорость АД, который, ввиду незначительной величины, практически не влияет на общую энергетическую картину. При подъеме пустой кабины энергия статических сил тяжести является генерирующей, но она не превышает сумму потерь энергии в двигателе и на трение.

Особенностью энергетических диаграмм в динамических режимах являются незначительные, практически незаметные, значения энергии динамических сил и моментов. Это объясняется тем, что в цикле пуск - торможение кинетическая энергия на участке пуска накапливается, а на участке торможения потребляется, компенсируя часть потерь. Теоретически эта энергия за цикл перемещения должна быть нулевой, но на практике она отличается от нуля, поскольку существует переменное значение КПД червячной механической передачи, которое формируется в зависимости от общей загрузки редуктора и может быть разным в моменты накопления и отдачи кинетической энергии.

Выводы

1. Приведенная методика моделирования является универсальной и может применяться как инструментарий для исследования работы двухскоростных асинхронных электроприводов пассажирских лифтов. Моделирование может выполняться, как с помощью комплексных программных пакетов, (например Simulink Mathlab), так и на основе авторской пользовательской программы.
2. Традиционный электропривод пассажирского лифта с двухскоростным асинхронным двигателем и червячным глобоидным редуктором представляет собой пример неэффективного преобразования как электрической, так и механической энергии.
3. Благодаря большим потерям энергии, при любой загрузке кабины, отсутствует продолжительная рекуперация энергии в сеть, а незначительный по продолжительности и объему генерации участок при переходе на пониженную скорость, на энергетическую диаграмму электромеханической системы лифта существенно не влияет.
4. Несовершенный способ точной остановки путем перехода на пониженную скорость приводит к существованию довольно продолжительного участка подхода

кабины к заданному этажу, который значительно снижает энергетические показатели и производительность пассажирского лифта.

Литература

[1] Лифты. Учебник для вузов / под общей ред. Д. П. Волкова. - М.: АСВ, 1999.- 480 с.

[2] Андрющенко О.А., Бойко А.О. Повышение технического уровня пассажирских лифтов Украины, эволюция или революция?/ Андрющенко О.А. // Экономист. - 2011. - №8. - С.75-79

[3] Архангельский Г.Г. Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения // Стройпрофиль №7, 2008. С. 94-96.

[4] Макаров Л.Н. Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности // Электротехника. 2006. - №5. - С. 42-46.

[5] Андрющенко О.А, Бойко А.О., Акчебаш Н.В. Особливості математичного моделювання двохшвидкісного асинхронного електропривода пасажирського ліфту // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2013, Вип. 2 (41). - С 164 – 168.

[6] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.

[7] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. - М.: Наука, 1986. - 544 с.

[8] Бойко А.А. Синтез и анализ диаграмм движения лифтовых подъемных механизмов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Збірник наукових праць. - Вип. 4(5) - Одеса: АО Бахва, 2013. - С. 83-91.

[9] Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1998. -704 с

[10] Андрющенко О. А., Булгар В. В., Семенюк В. Ф. Пассажирский лифт как электромеханическая система. Перспективы и проблемы совершенствования энергетических показателей // Научно-технический и производственный журнал «Подъемные сооружения. Специальная техника». - №2. - 2010. - С 23-28.

[11] Андрющенко О.А., Семенюк В. Ф., Бойко А.О., Кнюх А.Б. Совершенствование энергетических показателей лифтовых лебедок. Критический анализ мировых достижений // Научно-технический и производственный журнал «Подъемные сооружения. Специальная техника». - №11 (129). - 2012. - С. 23-29.

Сведения об авторах:

Бойко Андрей Александрович 02.08.1977. Окончил Одесский политехнический университет в 1999 году. В 2002 году защитил диссертацию кандидата технических наук. С 2005 года – доцент. С 2010 года – директор института электромеханики и энергоменеджмента Одесского национального политехнического университета. Область научных интересов - методы исследования, разработка и модернизация электромеханических систем современных пассажирских лифтов. E-mail: dart77@ukr.net

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ТРАНСПОРТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ С АЛГОРИТМАМИ СИНХРОННОЙ МОДУЛЯЦИИ

В.И. Олещук, В. В. Ермуратский
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. Алгоритмы синхронной векторной широтно-импульсной модуляции адаптированы применительно к использованию в шестифазной преобразовательной системе транспортного назначения с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя, питающихся от нескольких автономных инверторов напряжения. Выполнено моделирование процессов в системах на базе MATLAB-пакета прикладных программ. Показано, что использование алгоритмов синхронной векторной модуляции позволяет обеспечить симметрию фазного выходного напряжения при любых (в том числе дробных) соотношениях между частотой коммутации вентилей и выходной частотой системы, а также при любых соотношениях амплитуд четырех источников постоянного тока, питающих систему. При этом в спектре фазного напряжения на всем диапазоне регулирования отсутствуют четные гармоники и субгармоники (основной частоты), что является особенно важным для электроприводов для транспортных систем средней и большой мощности.
Ключевые слова: Регулируемый электропривод транспортного назначения, автономные инверторы напряжения, векторная широтно-импульсная модуляция.

SISTEMUL DE CONVERTIZARE AL ACŢIONĂRILOR ELECTRICE DE TRANSPORT DE PUTERE MAJORATĂ ÎN BAZA ALGORITMILOR DE MODULARE SINCRONĂ

Olesciuk V., Ermuratschii V.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Algoritmii de modulare vectorială sincronă au fost adaptaţi pentru a fi utilizaţi în sistemul de conversie cu saşe faze destinat transportului cu înfăşurările deschise a motorului electric asincron, alimentate de la câteva convetizoare de tensiune. S-a efectuat modelarea proceselor în sisteme în baza pachetului de programe MATLAB. S-a demonstrat, că utilizarea algoritmilor de modulare vectorială sincronă permite asigurarea simetriei tensiunei de ieşire pe faze pentru orice raport între frecvenţa de comutaţie a cheilor şi a frecvenţei de bază a sistemului, precum şi orice alt raport dintre amplitudinile celor patru surse de alimentare în curent continuu. În acest caz în spectrul tensiunii de fază pentru toată banda de reglare lipsesc armonicile pare şi subarmonicile (a frecvenţei de bază), ceea ce este important pentru acţionările electrice în transportul electric de putere medie şi mare.
Cuvinte-cheie: Acţionări electrice reglabile pentru transportul electric, convertizoarele de tensiune, modulare sincronă vectorială.

POWER ELECTRONIC SYSTEM FOR POWER ELECTRIC VEHICLES WITH ALGORITHMS OF SYNCHRONOUS MODULATION

Oleschuk V., Ermuratskii V.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. Schemes of synchronous space-vector modulation have been adapted for control of split-phase drive for electric vehicle with open-end windings of induction motor, supplied by several voltage source inverters. MATLAB-based simulation of processes in this system has been executed. It has been shown, that the use of algorithms of synchronous modulation provides symmetry of phase voltage waveforms for any ratio between the switching frequency and fundamental frequency, and for any voltage magnitudes of dc-sources. Spectra of the phase voltage of system do not contain even harmonics and subharmonics (of the fundamental frequency), which is especially important for drives for the medium-power and high-power electric vehicles.
Keywords: Adjustable speed AC drive for electric transport, voltage source inverters, space-vector pulsewidth modulation.

Введение

Многофазные, и, в частности, шестифазные регулируемые электроприводы переменного тока обладают рядом преимуществ по сравнению со стандартными трехфазными системами преобразования параметров электрической энергии [1]-[5]. К числу перспективных областей применения шестифазных преобразовательных систем относятся в первую очередь электроприводы средней и большой мощности для электротранспорта, для электровозов, для судового тягового привода, и т.п.

В последнее время была предложена новая топология сдвоенной трехфазной преобразовательной системы на базе четырех инверторов напряжения, позволяющая увеличить в четыре раза установленную мощность типовой системы, базирующейся на стандартном трехфазном инверторе [6]. Рис. 1 представляет базовую структуру такой системы, состоящей из двух групп по два инвертора, выходы которых подключены к разомкнутыми обмотками асимметричного шестифазного электродвигателя. В этом случае асинхронный электродвигатель имеет две группы обмоток, пространственно сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов.

Известно, что для электроприводов повышенной мощности для устранения из спектра выходного напряжения нежелательных субгармоник (основной частоты) необходимо обеспечивать непрерывную синхронизацию кривой выходного напряжения на всем диапазоне регулирования [7]-[9]. В связи с этим был разработан и предложен для применения в преобразовательных системах различного функционального назначения новый альтернативный метод синхронной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигналов инверторов напряжения [10]-[17].

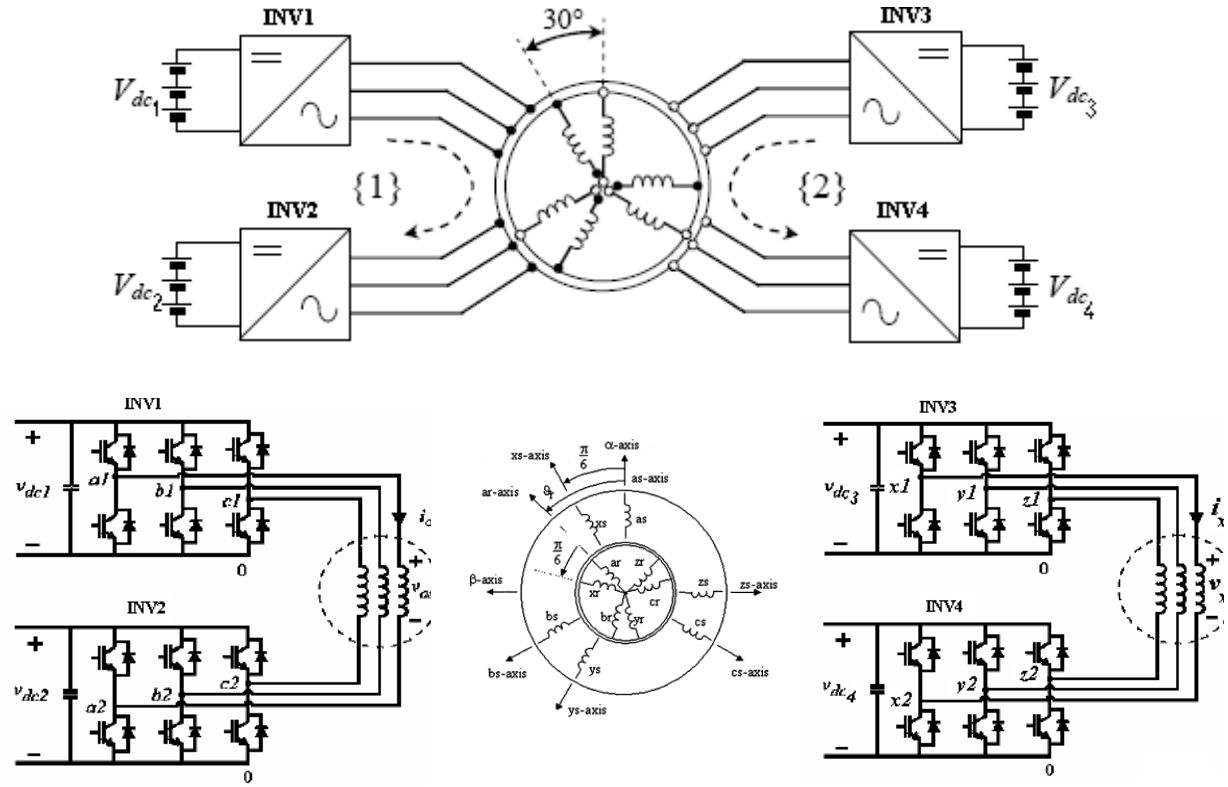


Рис. 1. Топология сдвоенной трехфазной системы на базе четырех инверторов (первой инверторной группы **INV1+INV2**, и второй группы **INV3+ INV4**), питающих асимметричный асинхронный электродвигатель с разомкнутыми обмотками

Свойства и особенности метода синхронной векторной модуляции

Для обеспечения непрерывной синхронизации кривых выходного напряжения инверторов многоинверторной шестифазной преобразовательной системы метод синхронной векторной ШИМ может быть использован для регулирования каждого из инверторов такой системы [10],[11]. На рис. 2 – 3 показаны состояния ключей, а также управляющие и выходные сигналы трехфазного инвертора напряжения на интервале 0^0 – 90^0, иллюстрирующие схематично непрерывную (рис. 2) и прерывистую (рис. 3) версии синхронной векторной модуляции. Верхние диаграммы на рис. 2 – 3 показывают последовательность переключения ключей в инверторе (в соответствии с общепринятыми обозначениями [10]), нижеприведенные кривые показывают управляющие сигналы ключей катодной группы фаз *a, b, c* (*x, y, z*) каждого инвертора шестифазной системы, совпадающие по форме с полярными напряжениями в соответствующих узлах инвертора. Нижние кривые на рис. 2 - 3 показывают соответствующие участки линейного выходного напряжения инверторов. При этом продолжительность сигналов β_1 характеризует общую продолжительность включенного состояния ключей внутри тактового интервала τ, сигналы γ формируются по краям (рис. 2) или в центре (рис. 3) соответствующего β-сигнала. Продолжительность сигналов λ характеризует длительность пауз нулевого уровня внутри тактовых интервалов [10],[11]. Одна из базовых особенностей метода синхронной ШИМ заключается в том, что положение центральных активных β_1-сигналов жестко фиксируется в серединах соответствующих 60-градусных тактовых интервалов, а формирование остальных управляющих сигналов и пауз нулевого уровня осуществляется симметрично относительно указанных центральных сигналов. При этом специальные сигналы $\lambda^{'}$ (λ_5 на рис. Fig. 2, λ_4 на рис. 3) вместе с соседними сигналами $\beta^{''}$ (β_5 на рис. 2, β_4 на рис. 3) формируются в тактовых точках периода выходного напряжения инвертора (0^0, 60^0, 120^0..), и продолжительность этих сигналов уменьшается до близкого к нулю значения на граничных частотах между поддиапазонами управления, обеспечивая симметрию кривой выходного напряжения инвертора.

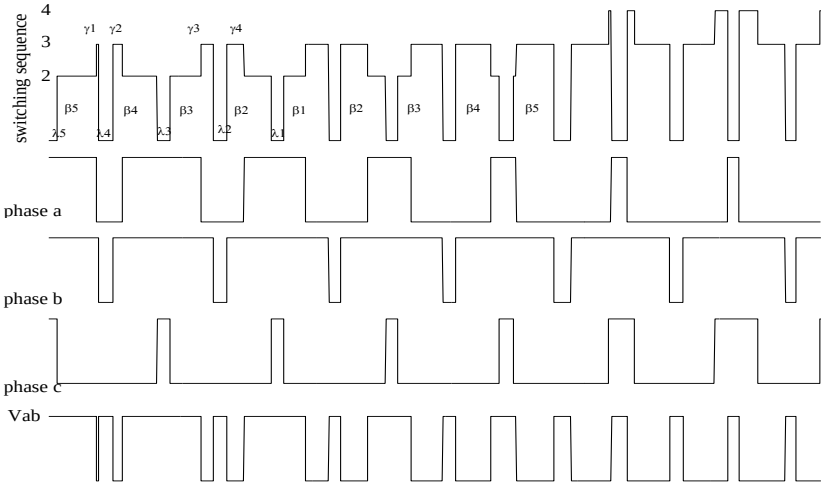


Рис. 2. Последовательность переключения ключей, полярные напряжения и линейное напряжение V_{ab} инвертора с непрерывной синхронной модуляцией

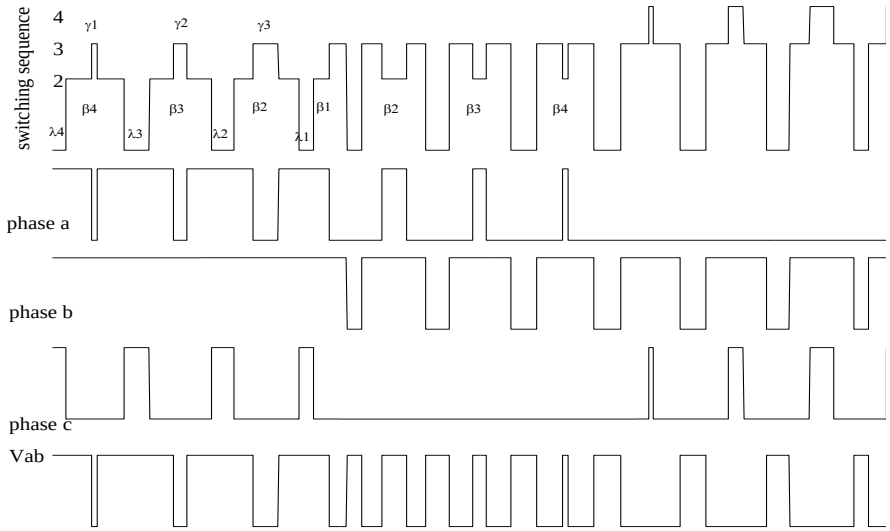


Рис. 3. Последовательность переключения ключей, полярные напряжения и линейное напряжение V_{ab} инвертора с прерывистой синхронной модуляцией

Синхронная ШИМ в шестифазной системе на базе четырех инверторов

Регулирование четырех трехфазных инверторов, питающих асимметричный шестифазный электродвигатель, имеет специфические особенности. В частности, четыре инвертора формируют в этом случае две группы по два инвертора в каждой, и каждая инверторная группа подключена при этом к соответствующим выводам соответствующих разомкнутых обмоток электродвигателя (рис. 1). Синхронное и симметричное регулирование выходного напряжения каждого инвертора каждого инверторного блока в соответствии с алгоритмами синхронной ШИМ обеспечивает формирование симметричного фазного напряжения в обмотках шестифазного электродвигателя. При этом величина фазового сдвига между кривыми выходного напряжения двух инверторов каждой из инверторных групп должна составлять половину длительности тактового подинтервала τ [18].

В случае, когда напряжения двух источников постоянного тока инверторной группы имеют одну величину, результирующий вектор напряжения является эквивалентным вектору напряжения трехуровневого инвертора [3],[6],[18]. При этом фазные напряжения V_{as} и V_{xs} первой и второй групп сдвоенных инверторов с изолированными источниками питания (рис. 1) определяются в соответствии с (1)-(4) [19]:

$$V_{01} = 1/3\cdot\left(V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} + V_{a2} + V_{b2} + V_{c2}\right); \quad (1)$$

$$V_{as} = V_{a1} + V_{a2} - V_{01}; \quad (2)$$

$$V_{02} = 1/3\cdot(V_{x1} + V_{y1} + V_{z1} + V_{x2} + V_{y2} + V_{z2}); \quad (3)$$

$$V_{xs} = V_{x1} + V_{x2} - V_{02}; \quad (4)$$

где V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} и V_{x1}, V_{y1}, V_{z1}, V_{x2}, V_{y2}, V_{z2} – полярные напряжения каждой группы трехфазных инверторов, V_{01} и V_{02} – соответствующие напряжения нулевой последовательности.

В то же время, регулирование в анализируемой шестифазной системе электропривода базируется на 30-градусном фазовом сдвиге управляющих и выходных сигналов двух вышеупомянутых инверторных групп [2],[5]. В качестве иллюстрации процесса синхронного регулирования сдвоенной трехфазной системы с синхронной ШИМ при одинаковой величине напряжения источников питания постоянного тока ($V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$), рис. 4 – 7 показывают базовые формы напряжения в системе на периоде выходной частоты (полярные напряжения V_{a1}, V_{a2}, V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1}, V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{as} (вместе со спектром фазного напряжения V_{as})), при регулировании на базе алгоритмов непрерывной синхронной ШИМ (рис. 4 – 5), а также на базе алгоритмов прерывистой ШИМ с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей (рис. 6 – 7). Выходная частота системы и средняя частота коммутации вентилей при этом соответственно равны $F=35Hz$ and $F_s = 1\ kHz$, коэффициенты модуляции всех инверторов равны $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$ в данном случае. В частности, приведенные на рис. 4 – 7 кривые показывают, что выходное напряжение инверторов с синхронной модуляцией имеет четвертьволновую симметрию, и в спектре фазного напряжения системы отсутствуют четные гармоники и субгармоники.

В случае неравенства напряжений источников постоянного тока, когда $V_{dc1} \neq V_{dc2}$ и $V_{dc3} \neq V_{dc4}$ (но $V_{dc1}=V_{dc3}$ и $V_{dc2}=V_{dc4}$), для обеспечения эквивалентности выходных напряжений двух инверторов каждой из инверторных групп при скалярном $V/F=const$ режиме управления необходимо обеспечить соответствующую корреляцию между коэффициентами модуляции инверторов и амплитудами напряжения источников питания:

$$m_1\ V_{dc1} = m_2\ V_{dc2}\ ; \tag{5}$$

$$m_3\ V_{dc3} = m_4\ V_{dc4}. \tag{6}$$

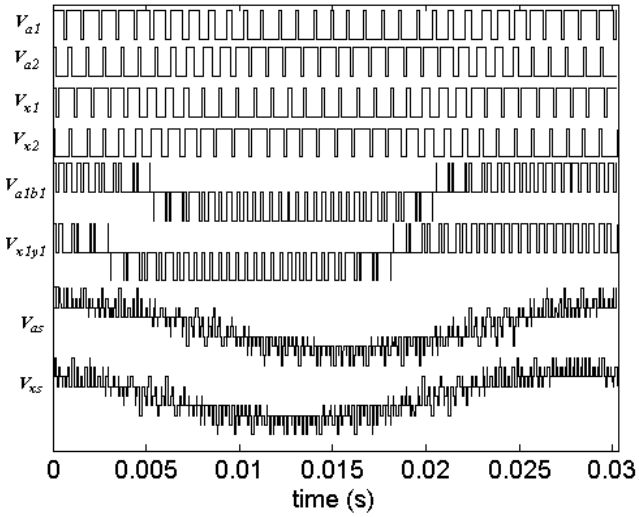


Рис. 4. Полярные напряжения V_{a1}, V_{a2} и V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1} и V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$, $F_s=1kHz$)

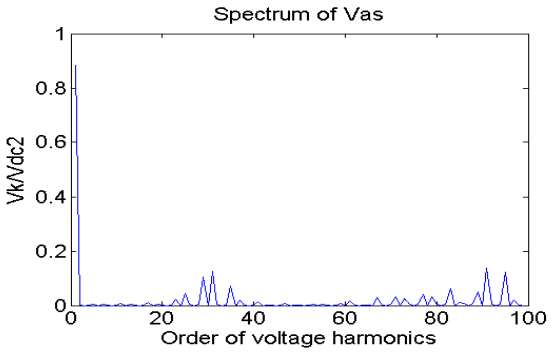


Рис. 5. Спектр фазного напряжения V_{as} в системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $F_{s1}=1kHz$)

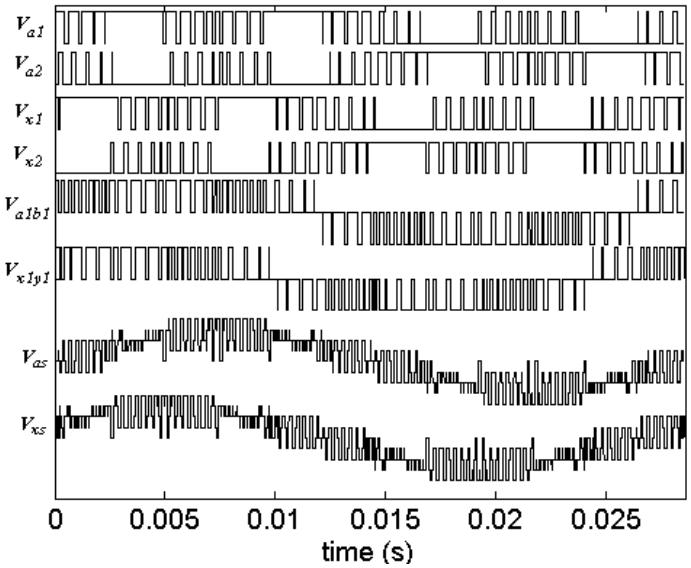


Рис. 6. Полярные напряжения V_{a1}, V_{a2} и V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1} и V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$, $F_s=1kHz$)

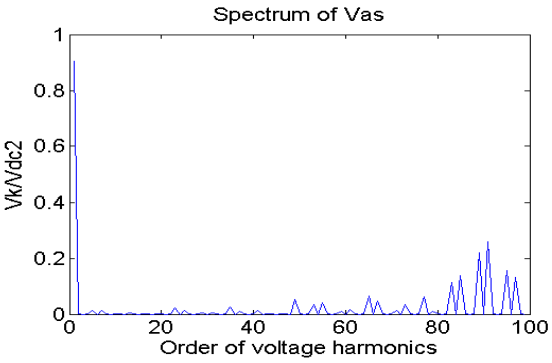


Рис. 7. Спектр фазного напряжения V_{as} в системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $F_{s1}=1kHz$)

В частности, в случае, если $V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $V_{dc3}=0.7V_{dc4}$ и $m_2=m_4=0.7$, в соответствии с (5)-(6) $m_1=m_3=0.93$, при этом последняя величина коэффициента модуляции соответствует режиму работы двух соответствующих инверторов в зоне сверхмодуляции.

Для иллюстрации хода процессов в шестифазной преобразовательной системе на базе четырех инверторов с синхронной модуляцией, питающихся от четырех источников постоянного напряжения с разными амплитудами ($V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $V_{dc3}=0.7V_{dc4}$, $V_{dc2}=V_{dc4}$), рис. 8 – 11 представляют результаты моделирования процессов в такой системе. В частности, на рис. 8 – 9 приведены кривые базовых напряжений V_{a1b1}, V_{a2b2} и V_{as} в системе, а также спектры этих напряжений, при регулировании на базе алгоритмов непрерывной синхронной модуляции. Рис. 10 представляет аналогичные формы напряжения в шестифазной системе, регулируемой на базе алгоритмов прерывистой синхронной ШИМ с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей. Рис. 11 показывает спектральный состав линейных и фазных напряжений первой инверторной группы. Выходная частота системы и средняя частота коммутации вентилей при этом соответственно равны $F = 35$ *Hz* and $F_s=1kHz$. При этом следует также отметить, что спектральный состав базовых напряжений второй инверторной группы характеризуется в данном случае аналогичными характеристиками.

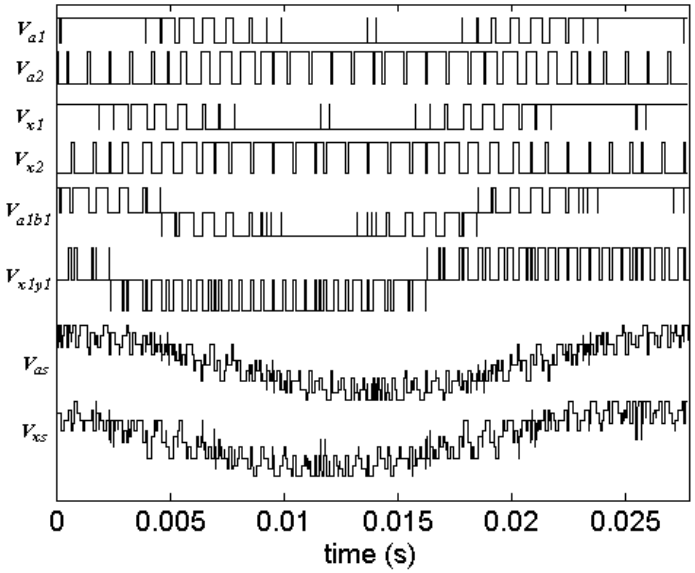


Рис. 8. Полярные напряжения V_{a1}, V_{a2} и V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1} и V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $V_{dc3}=0.7V_{dc4}$, $V_{dc2}=V_{dc4}$, $m_1=m_3=0.933$, $m_2=m_4=0.7$, $F_s=1kHz$)

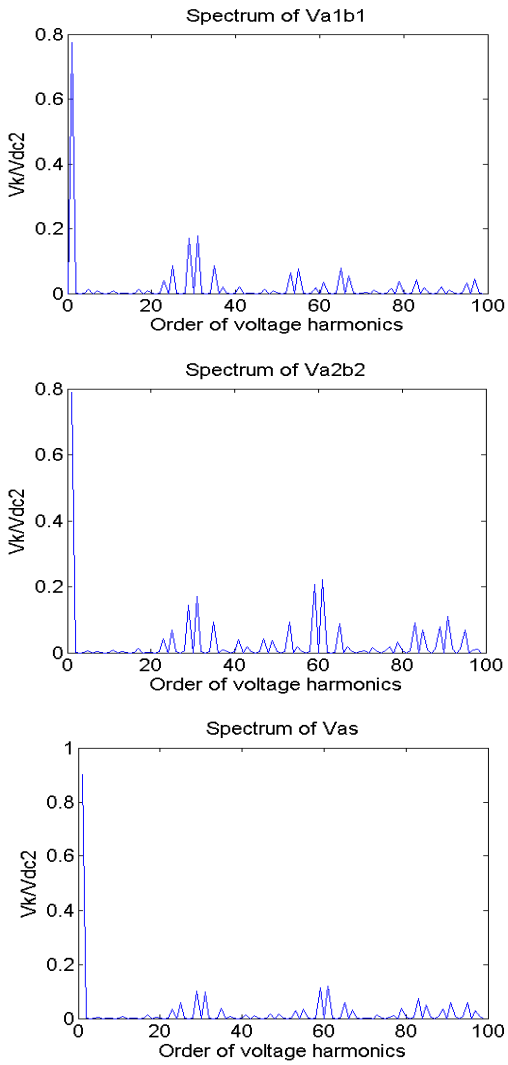


Рис. 9. Спектры напряжений V_{a1b1}, V_{a2b2} и V_{as} в шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $F_s=1kHz$)

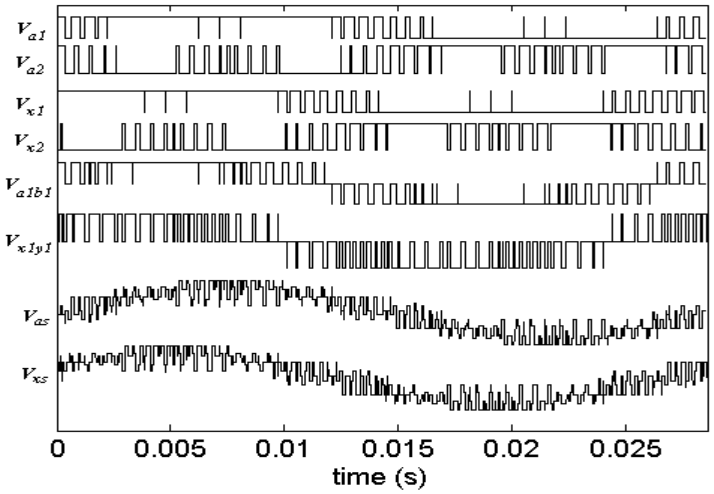


Рис. 10. Полярные напряжения V_{a1}, V_{a2} и V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1} и V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $V_{dc3}=0.7V_{dc4}$, $V_{dc2}=V_{dc4}$, $m_1=m_3=0.933$, $m_2=m_4=0.7$, $F_s=1kHz$)

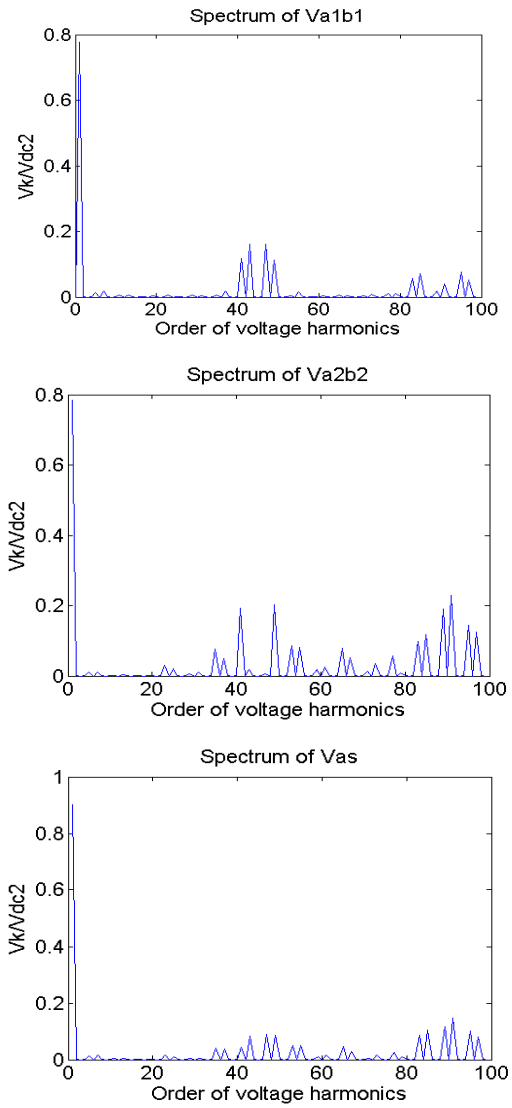


Рис. 11. Спектры напряжений V_{a1b1}, V_{a2b2} и V_{as} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $F_s=1kHz$)

Для сдвоенной трехфазной системы электропривода на базе четырех инверторов с разными напряжениями источников постоянного тока для обеспечения баданса мощностей *P1/P2* и *P3/P4* между четырьмя источниками питания двух инверторных групп (при скалярном *V/F=const* режиме работы), необходимо обеспечить выполнение соотношений (7)-(8), связывающих между собой амплитуды напряжений источников питания, коэффициенты модуляции инверторов и номинальное соотношение мощностей источников питания [14]:

$$\frac{m_1 V_{dc1}}{m_2 V_{dc2}} = \frac{P_1}{P_2} \tag{7}$$

$$\frac{m_3 V_{dc3}}{m_4 V_{dc4}} = \frac{P_3}{P_4} \tag{8}$$

В частности, для рассматриваемой системы шестифазного электропривода необходимо обеспечить равное распределение мощностей двух инверторных групп, питающих асимметричный шестифазный электродвигатель:

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4. \qquad (9)$$

В этом случае, в соответствии с (7)-(8), для сбалансированного (по мощности) функционирования системы необходимо обеспечить выполнение (10), в котором мощность каждого инвертора многоинверторной системы описывается в относительных величинах как часть общей мощности системы:

$$m_1 V_{dc1} P_2 + m_2 V_{dc2} P_1 = m_3 V_{dc3} P_4 + m_4 V_{dc4} P_3. \qquad (10)$$

В качестве иллюстрации режима сбалансированного функционирования системы с прерывистой синхронной модуляцией при разных амплитудах напряжения четырех источников питания, на рис. 12 – 13 приведены кривые базовых напряжений в системе, и спектры напряжений V_{a1b1}, V_{a2b2}, V_{as} и V_{xs}. Выходная частота и средняя частота коммутации вентилей при этом равны соответственно $F=35Hz$ и $Fs=1kHz$. Относительные величины напряжений источников питания определены в данном случае относительно максимального напряжения четвертого источника ($V_{dc4}=1$):

$$V_{dc1} = 0,72V_{dc4};\ V_{dc2} = 0.,V_{dc4};\ V_{dc3} = 0,75V_{dc4}. \qquad (11)$$

Коэффициент модуляции четвертого инвертора, питающегося от источника с максимальным напряжением, равен в этом случае $m_4 = 0.7$. В случае одинаковых мощностей всех четырех источников питания ($P_1 = P_2 = P_3 = P_4$), в соответствии с (10) коэффициенты модуляции трех остальных инверторов определяются для данного режима как: $m_1 = 0.97$, $m_2 = 0.777$; $m_3 = 0.933$. Как следует из спектрограмм, приведенных на рис. 13, амплитуды фазных напряжений V_{as} и V_{xs} в системе с синхронной ШИМ равны между собой. Тем самым, в шестифазной системе обеспечивается баланс мощностей между двумя секциями трехфазных обмоток шестифазного электродвигателя.

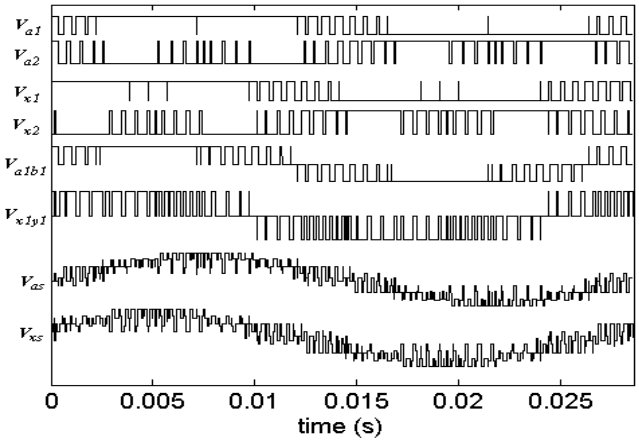


Рис. 12. Полярные напряжения V_{a1}, V_{a2} и V_{x1}, V_{x2}, линейные напряжения V_{a1b1} и V_{x1y1}, и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой ШИМ ($F=35Hz$, $V_{dc1}=0.8V_{dc2}$, $V_{dc2}=0.9V_{dc4}$, $V_{dc3}=0.75V_{dc4}$, $m_1=0.97$, $m_2=0.777$, $m_3=0.93$, $F_s=1kHz$)

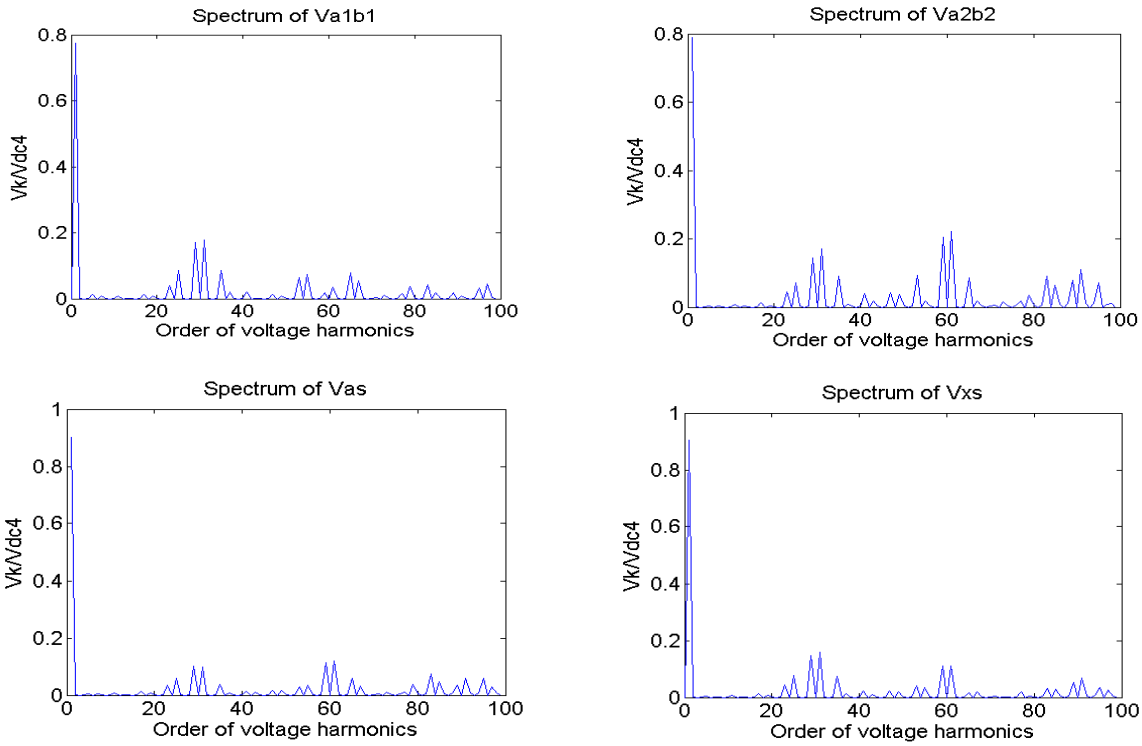


Рис. 13. Спектры напряжений V_{a1b1}, V_{a2b2}, V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35Hz$, $F_s=1kHz$)

Фазные напряжения V_{as} and V_{xs} шестифазного электропривода на базе четырех инверторов с синхронной модуляцией обладают четвертьволновой или полуволновой симметрией на всем диапазоне регулирования, благодаря чему в спектре выходного напряжения отсутствуют четные гармоники и субгармоники (см. рис. 4 - 13), способствующие возникновению дополнительных потерь в системах электропривода.

С целью сопоставления характеристик асимметричной шестифазной системы на базе двух инверторов ([2], стандартная топология системы), и на базе четырех инверторов (новая структура шестифазной системы [6], являющаяся базовой для данного исследования), выполнен расчет взвешенного коэффициента искажений (*WTHD*) фазного напряжения V_{as} в функции коэффициента модуляции m:

$$WTHD = (1/V_{as_1})(\sum_{k=2}^{1000}(V_{as_k}/k)^2)^{0.5}$$

На рис. 14 представлены результаты подобного сопоставительного анализа для систем с синхронной непрерывной модуляцией (CPWM), а также для систем с прерывистой синхронной ШИМ (DPWM). Принято, что напряжения источников электропитания системы равны между собой, при этом коэффициенты модуляции всех инверторов также равны между собой. Режим управления соответствует стандартному скалярному регулированию системы по закону $V/F=const$, средняя частота переключения вентилей каждого инвертора равна $F_s = 1\ kHz$.

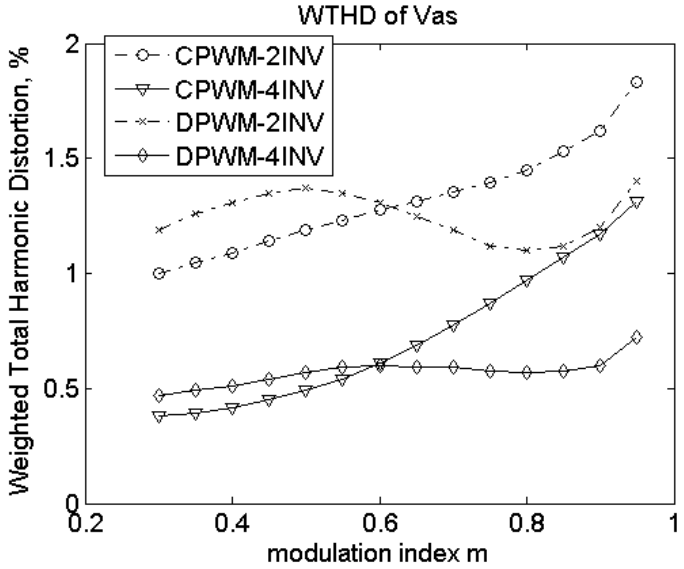


Рис. 14. Усредненная величина взвешенного коэффициента искажений *WTHD* фазного напряжения V_{as} в функции коэффициента модуляции *m* для шестифазной системы на базе двух инверторов (CPWM-2INV, DPWM-2INV), и для шестифазной системы на базе четырех инверторов (CPWM-4INV, DPWM-4INV)

Представленные интегральные характеристики спектрального состава фазного напряжения подтверждают тот факт, что степень искажения напряжений в шестифазной системе на базе четырех инверторов с синхронной ШИМ значительно ниже, чем в стандартных системах на базе двух инверторов. При этом в зоне пониженных и средних и средних выходных частот системы регулируемого электропривода на базе стандартных инверторов, при которых значения коэффициента модуляции выходного напряжения $m<0.6$, улучшенный спектральный состав выходного напряжения обеспечивается при использовании алгоритмов непрерывной векторной модуляции, а в зоне повышенных выходных частот (когда $m>0.6$), лучший гармонический состав выходного напряжения обеспечивается при использовании алгоритмов прерывистой модуляции

На рис. 15 представлены результаты анализа интегральных спектральных характеристик фазного напряжения V_{as} шестифазной системы на базе четырех инверторов с непрерывной (CPWM) и прерывистой (DPWM) разновидностями синхронной векторной модуляции при неодинаковых напряжениях V_{dc1} – V_{dc4} источников питания. В частности, для этого случая $V_{dc1} \neq V_{dc2}$ и $V_{dc3} \neq V_{dc4}$, но $V_{dc1}=V_{dc3}$ и $V_{dc2}=V_{dc4}$. Было проанализировано два базовых режима работы:

1) $V_{dc1} = 0.9V_{dc2}$, $V_{dc3}= 0.9V_{dc4}$, $K_{dc}=0.9$ в этом случае;

2) $V_{dc1} = 0.7V_{dc2}$, $V_{dc3}= 0.7V_{dc4}$, $K_{dc}=0.7$ в этом случае.

Результаты данного анализа показывают, что интегральные характеристики спектрального состава фазного напряжения в шестифазной системе на базе четырех инверторов с прерывистой синхронной ШИМ лишь в незначительной степени зависят от соотношения напряжений источников питания системы.

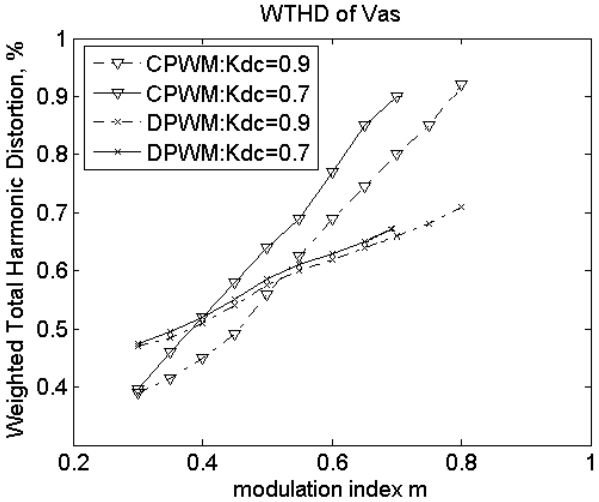


Рис. 15. Усредненная величина взвешенного коэффициента искажений *WTHD* фазного напряжения V_{as} в функции коэффициента модуляции $m=m_2=m_4$ для шестифазной системы на базе четырех инверторов с неодинаковыми напряжениями источников питания

Выводы

Показано, что в асимметричной шестифазной преобразовательной системе для электропривода на базе четырех стандартных инверторов напряжения использование алгоритмов синхронной векторной модуляции позволяет обеспечить симметрию фазного выходного напряжения при любых (в том числе дробных) соотношениях между частотой коммутации вентилей и выходной частотой системы, а также при любых соотношениях амплитуд четырех источников постоянного тока, питающих систему.

Установлено, что в зоне пониженных и средних и средних выходных частот многоинверторной системы регулируемого электропривода на базе стандартных инверторов, при которых значения коэффициента модуляции выходного напряжения $m<0.6$, улучшенный спектральный состав выходного напряжения обеспечивается при использовании алгоритмов непрерывной векторной модуляции, а в зоне повышенных выходных частот (при $m>0.6$), лучший гармонический состав выходного напряжения обеспечивается при использовании алгоритмов прерывистой модуляции.

В спектре фазного выходного напряжения преобразовательных систем с алгоритмами синхронной ШИМ на всем диапазоне регулирования отсутствуют четные гармоники и субгармоники (основной частоты), при этом наиболее рациональной областью использования преобразователей с синхронной ШИМ являются системы электропривода средней и большой мощности, в том числе системы мощного тягового электропривода.

Литература

[1] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H.A. Toliyat and S. Williamson, “Multiphase induction motor drives – a technology status review,” IET Electrical Power Applications, vol. 1, n. 4, pp. 489-516, 2007.

[2] R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo and A. Tenconi, “Dual-three phase induction machine drive control – a survey,” IEEJ Trans. on Industry Applications, vol. 126, n. 4, pp. 420-429, 2006.

[3] G. Grandi, G. Serra and A. Tani, "General analysis of multiphase systems based on space vector approach," Proc. of the IEEE-EPE Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMC'2006), pp. 834-840, 2006.
[4] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable speed applications," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, n. 5, pp. 1893-1909, 2008.
[5] V. Oleschuk and G. Griva, "Synchronized space-vector modulation for six-phase automotive drive with controlled switching frequency," International Review of Electrical Engineering, vol. 4, n. 1, pp. 50-56, 2009.
[6] G. Grandi, A. Tani, P. Sanjeevkumar and D. Ostojic, "Multi-phase multi-level AC motor drive based on four three-phase two-level inverters," Proc. of the IEEE International Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM'2010), pp. 1768-1775, 2010.
[7] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electric power conversion," Proceedings of IEEE, vol. 82, n. 8, pp. 1194-1213, 1994.
[8] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, Power Electronics, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.
[9] R.K. Jardan, P. Stumpf, P. Bartal, Z. Varga and I. Nagy, "A novel approach in studying the effects of subharmonics on ultrahigh speed AC motor drives," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 58, n. 2, pp. 627-635, 2011.
[10] V. Oleschuk and F. Blaabjerg, "Direct synchronized PWM techniques with linear control functions for adjustable speed drives," Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC'2002), pp. 76-82, 2002.
[11] V. Oleschuk, F. Blaabjerg and B.K. Bose, "Analysis and comparison of algebraic and trigonometric methods of synchronous PWM for inverter drives," Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC'02), pp. 1439-1444, 2002.
[12] V. Oleschuk, R. Bojoi, F. Profumo, A. Tenconi and A.M. Stankovic, "Multifunctional six-phase motor drives with algorithms of synchronized PWM," Proc. of the IEEE Industrial Electronics Conf. (IECON'2006), pp. 1293-1300, 2006.
[13] V. Oleschuk, F. Profumo and A. Tenconi, "Five-phase inverters with synchronized pulsewidth modulation," International Review of Electrical Engineering, vol. 2, n. 2, pp. 123-129, 2007.
[14] V. Oleschuk, R. Bojoi, G. Griva and F. Profumo, "Dual inverter-fed traction drive with DC sources power balancing based on synchronized PWM," in Proc. of the IEEE International Electrical Machines and Drives Conf. (IEMDC'2007), pp. 260-265, 2007.
[15] V. Oleschuk, F. Profumo and A. Tenconi, "Analysis of operation of symmetrical dual three-phase converters with hybrid schemes of synchronised PWM," International Review of Electrical Engineering, vol. 2, n. 6, pp. 793-802, 2007.
[16] V. Oleschuk and G. Griva, "Simulation of processes in synchronized cascaded inverters for photovoltaic application," International Review of Electrical Engineering, vol. 4, n. 5(A), pp. 928-936, 2009.
[17] V. Oleschuk, G. Griva and F. Spertino, "Dual neutral-point-clamped converters with synchronized PWM for photovoltaic installations," International Review of Electrical Engineering, vol. 5, n. 1(A), pp. 55-63, 2010.
[18] H. Stemmler and P. Guggenbach, "Configurations of high power voltage source inverter drives," Proc. of the European Power Electronics Conference (EPE'93), pp. 7-12, 1993.
[19] E.G. Shivakumar, K. Gopakumar, S.K. Sinha, A. Pittet and V.T. Ranganathan, "Space vector PWM control of dual inverter fed open-end winding induction motor drive," Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC'2001), pp. 399-405, 2001.

Сведения об авторах.

Олещук Валентин Игоревич (oleschukv@hotmail.com), доктор (хабилитат) технических наук, главный научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы. Областью его научных интересов являются стратегии управления и модуляции для силовых преобразователей параметров электрической энергии, для регулируемого электропривода, и для систем возобновляемой электроэнергии.

Ермуратский Владимир Васильевич (ermuratskie@gmail.com), доктор (хабилитат) технических наук, главный научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы, Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, силовые полупроводниковые преобразователи, электрические конденсаторы, энергетическая эффективность, теплоэнергетика, теплотехника.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Бошняга В.А., Суслов В.М.
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. На основе предложенной ранее модели проведены расчеты и изучены особенности установившихся особых несимметричных режимов работы трехфазного силового автотрансформатора с трехстержневой конструкцией магнитопровода с третичной обмоткой, соединенной в треугольник. Расчеты проведены с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках автотрансформатора при обрыве одной из фаз питающего напряжения и ее одновременном коротком замыкании на землю со стороны АТ, по этим данным построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов. Рассмотренный режим при заземленной нейтрали характеризуется возникновением значительных токов во всех обмотках, такого же порядка, что и номинальные токи. Напряжения обмоток при этом изменяются незначительно по сравнению с номинальными величинами, за исключением закороченной фазы. Кроме того, возникает заметный поток нулевой последовательности, что может привести к дополнительному нагреву АТ. При разземлении нейтрали в рассмотренном режиме его особенности связаны с наличием или отсутствием нагрузки на стороне СН. При отсутствии нагрузки реализуется режим намагничивания АТ с малыми токами и значительным смещением нейтрали, а при ее наличии, несмотря на отсутствие тока в нейтрали, появляется поток нулевой последовательности и токи в обмотках, сравнимые с номинальными. В общем случае, токи данного повреждения (как и в предыдущем случае) значительно меньше обычных токов к.з., и недостаточны для срабатывания релейной защиты, что может потребовать принятия дополнительных мер для защиты от подобных повреждений.
Ключевые слова: Модель трансформатора, особые несимметричные режимы, автотрансформатор, трехстержневой магнитопровод, магнитный поток нулевой последовательности.

INVESTIGAREA MODURILOR ASIMETRICE SPECIALE A AUTOTRANSFORMATORULUI TRIFAZAT CU MIEZ DIN TREI TIJE

Boşneaga V.A., Suslov V.M.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. În baza modelului propus anterior sunt investigate modurile speciale permanente asimetrice a autotransformatorului de putere trifazat cu miez din trei tije şi cu bobina tetiara, conectată in treungi. Calculile au fost efectuate, ţinând cont de cuplarea electromagnetică dintre înfăşurările, situate pe diferite tije. Sunt calculate modulele şi fazele vectorilor de curent şi tensiune în bobinele autotransformatorului la ruperea unei faze şi scurtcircuitul ei la pămint din partea autotransformatorului; reeşind din date obţinute, au fost construite diagrame vectoriale, care prezintă o viziune clara despre particularităţile acestor regime. Regimul calculat cu punctu neutru, pus la pămint, se caracterizeaza prin apariţia curenţilor esenţiali, de aceiaşi mărime, ca şi curenţii nominali. Adăugator la aceasta, apare fluxul magnetic de secvenţă homopolară, ce poate duce la incălzirea adăugătoare al AT. Curenţii, care apar la asemenea defecte, sunt mult mai mici, decît curenţii de scurt circuit, si deci, nu sunt suficienţi pentru declanşarea protecţiei prin relee, fapt, care poate duce la necesitatea aplicării masurilor speciale pentru protecţia în asa regime.
Cuvinte-cheie: Modelul transformatorului, moduri asimetrice speciale, autotransformator, miez din trei tije, fluxul magnetic de secvenţă homopolara.

INVESTIGATION OF SPECIAL ASYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE THREE-LEG AUTOTRANSFORMERS

Bosneaga V.A., Suslov V.M.
Power Engineering Institute of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. On the base of earlier proposed model calculations were made and were investigated peculiarities of special asymmetric modes of three-phase three legs autotransformer (AT) with tertiary winding, connected in triangle. Calculations were carried out taking into account the electromagnetic coupling of coils, located on different legs. Modules and angles of currents and voltages vectors in autotransformer windings were calculated at breakage of one of the phases of the supply voltage and its simultaneous fault to ground at the side of AT. Based on these data vector diagrams were constructed, which give a visual representation of specific features of such regimes. Considered mode at grounded neutral is characterized by the occurrence of significant currents of the same value in all windings, app. equal to nominal current. Voltage of the windings varies slightly from the nominal values, except for the short-circuited phase. Furthermore, there is a considerable flow of the zero sequence flux, which may lead to additional heating of AT. At ungrounded neutral in this particular mode and absence of load on the secondary AT side, only a small magnetizing currents flows and neutral is significantly displaced. If the load is present, despite of the absence of the current in the neutral, currents in the windings, comparable with the nominal one appeared, also zero sequence flux appeared. In the general case, the currents of this failure (as in the previous case) are much smaller, than the usual short-circuit currents, so are insufficient to trigger the relay protection, this may require additional measures to protect AT against such damage.
Keywords: Transformer model, special asymmetric modes, autotransformer, three legs core, zero sequence magnetic flux.

Введение. Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых трансформаторов посвящено большое количество работ, начиная с классических книг Петрова Г.Н., Вольдека А.И., Васютинского С.Б. и др. авторов. Публикации, посвященные этой проблеме, включая методики расчета разнообразных режимов, в том числе и сложные комбинированные повреждения, продолжают появляться и в последние годы [1-5]. Значительно меньше публикаций, которые описывают полученные с помощью предложенных моделей конкретные результаты расчетов, или доведенные до практической реализации расчетные модели, позволяющие на основе доступных каталожных исходных заданных трансформатора провести расчет несимметричного установившегося режима для трехстержневого трансформатора, за исключением, пожалуй [6,7], где упоминается возможность использования разработанной модели также и для моделирования автотрансформатора, однако не приведено конкретных примеров расчета. В доступной авторам литературе нет какой-либо публикации, где были бы детально рассмотрены особые несимметричные режимы, заключающиеся, например, в одновременном обрыве фазы и ее коротком замыкании на землю со стороны автотрансформатора. Авторы данной статьи, на основе разработанной ими ранее модели трехстержневого трансформатора, описанной в [8], рассмотрели ряд подобных режимов, встречающихся в практике работы энергосистем.

Анализ особых режимов.

Рассмотрим с помощью упомянутой модели особенности некоторых установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового автотрансформатора с глухозаземленной нейтралью, с последовательной и общей обмотками, соединенными в звезду с заземленной нейтралью, и третичной обмоткой, соединенной в треугольник. Будем рассматривать наиболее простой случай с отсутствием нагрузки или компенсирующих устройств на третичной обмотке (отметим, что расчет варианта с нагруженной третичной обмоткой также возможен при наличии соответствующих исходных данных). При этом, учитывая, что для нулевой последовательности она является короткозамкнутой, учтем для упрощения этот факт в параметрах нулевой последовательности для данного автотрансформатора (АТ). При расчетах используем каталожные исходные данные для силового автотрансформатора 330/150 кВ, мощностью 250 МВА для прямой последовательности (I_0 =0,5%, UкВН-СН

= 10 %, Pxx= 180 кВт, Pкз= 600 кВт). На основании этих данных по общеизвестным формулам (см. например [9], стр. 192-193]) можно рассчитать действующие номинальные фазные напряжения последовательной (Uнпосл. =180/√3≈ 104 кВ) и общей обмоток (Uнобщ=150/√3≈ 87 кВ), значения номинальных токов последовательной (Iпосл =437 А) и общей обмоток (Iобщ=523 А), необходимые при сравнительном анализе получаемых результатов (см. схему рис.1). Отметим также, что номинальные значения фазных напряжений на выводах АТ составляют: ВН-330/√3≈190 кВ, СН- 150//√3≈ 87 кВ.

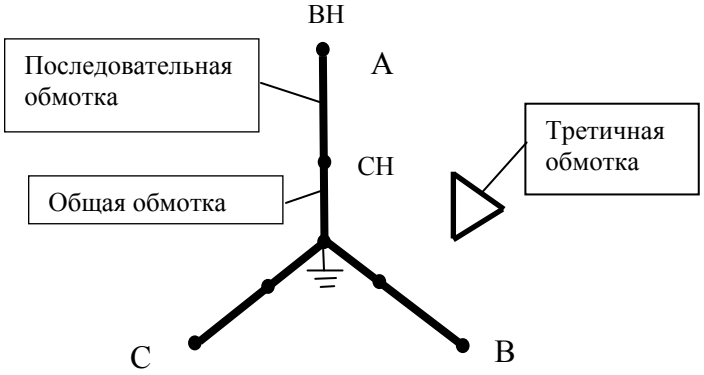


Рис.1. Условная схема соединения обмоток фаз АТ

Кроме того, для построения модели данного автотрансформатора необходимо задать параметры для нулевой последовательности, аналогичные используемым для прямой последовательности, такие как P_{0xx} и I_{0xx} [8]. Ввиду отсутствия опубликованных каталожных данных для нулевой последовательности для рассматриваемого АТ (в некоторых случаях они могут быть получены по запросу непосредственно у производителя автотрансформатора), примем в первом приближении их соответствующими 100% значению тока холостого хода для нулевой последовательности (см. например, [10]). В дальнейшем, при необходимости, или при получении уточненных данных, несложно пересчитать рассмотренные режимы и уточнить полученные результаты. Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не только в виде таблиц с числами, а также в виде векторных диаграмм (ВД), дающих наглядное представление об особенностях рассматриваемых режимов, а численные значения – будем приводить по мере необходимости. В качестве базы для сравнения и анализа получаемых результатов расчетов несимметричных режимов используем как исходный симметричный режим работы АТ в схеме рис.2, близкий к режиму номинальной нагрузки. Полученные на расчетной модели результаты для данного режима приведены в табл. 1

Таблица 1. Токи и напряжения обмоток в симметричном режиме нагрузки.

Обозначения обмоток		**Токи обмоток, А**		**Напряжения обмоток, В**	
		модуль	**Угол, град.**	**модуль**	**Угол, град.**
Последовательная обмотка	A	403.4	-4.212	1.067e+005	-1.086
	B	403.9	-124.2	1.068e+005	-121
	C	404	115.8	1.068e+005	118.9
Общая обмотка	A	483.2	176.4	8.866e+004	-3.9
	B	483.9	56.42	8.878e+004	-123.8
	C	484	-63.68	8.88e+004	116.1

Обмотки, расположенные на одном стержне и относящиеся к одной из фаз последовательной или общей обмотки обозначены, соответственно, буквами А, В, С. Как видно из приведенных значений токов и напряжений, режим симметричен с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Рассмотрим сначала один из несимметричных режимов, возникновение которого в одной из энергосистем, послужило толчком для написания настоящей статьи, а именно, обрыв одной из фаз питающего напряжения со стороны шин высшего напряжения (ВН) подстанции и замыкание ее на землю со стороны АТ. При этом выключатель со стороны шин СН разомкнут (см. рис.2).

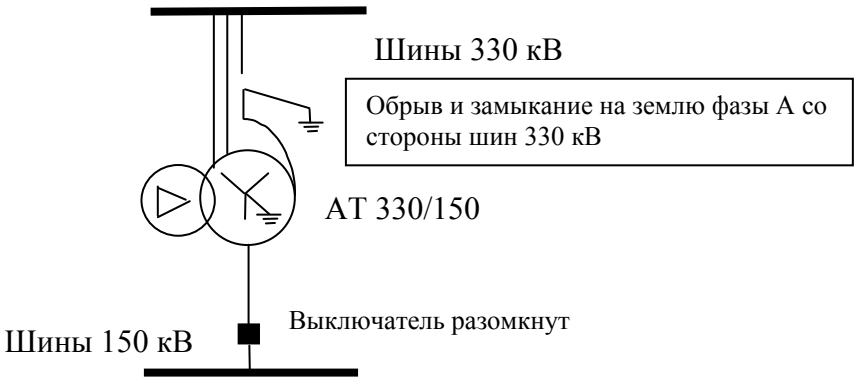


Рис.2. Однолинейная схема включения АТ между шинами 330 и 150 кВ подстанции

В известной авторам литературе отсутствует рассмотрение подобных режимов для случая трехфазного трехстержневого АТ, в котором обмотки, расположенные на разных стержнях имеют существенную электромагнитную связь. Результаты проведенных расчетов упомянутого режима приведены в таб.2 и на рис. 3-4. На рис.3 показана векторная диаграмма напряжений последовательной и общей обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ. (в расчете принято металлическое замыкание на землю, хотя в используемой модели не представляет принципиальной трудности учет реального сопротивления в месте замыкания). Токи на стороне СН равны нулю при разомкнутом выключателе со стороны шин 150 кВ (на рис.2 зачернен). В таблице 2 приведены полученные значения токов и напряжений обмоток АТ.

Таблица 2. *Токи и напряжения обмоток при обрыве фазы А и ее замыкании на землю со стороны АТ (нагрузка на стороне СН отключена).*

Обозначения обмоток		**Токи обмоток, А**		**Напряжения обмоток, В**	
		модуль	**Угол, град.**	**модуль**	**Угол, град.**
Последовательная обмотка	А	370.2	90.79	181.3	179.6
	В	370.6	91.13	1.044e+005	-117
	С	371.8	90.54	1.039e+005	117.2
Общая обмотка	А	370.2	90.79	181.3	-0.8344
	В	371.3	91.07	8.682e+004	-116.9
	С	371	90.48	8.646e+004	117

Напряжения обмоток короткозамкнутой фазы А малы (порядка 180 В) и не видны на ВД, напряжения обмоток фаз В и С близки к их величинам в нормальном симметричном режиме нагрузки и несколько смещены по фазе от их нормального положения (см. рис.3). В фазах В и С со стороны шин 330 кВ текут практически

одинаковые по модулю и фазе токи в 370А, а в закороченных обмотках фазы А текут такие же токи. В нейтрали течет значительный ток, равный 1112 А. В данном режиме возникает большой поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода. На рис.4 показана соответствующая ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях фаз В и С, а также суммарного потока нулевой последовательности, замыкающегося вне магнитопровода (утолщенная линия). Таким образом, рассмотренный режим характеризуется возникновением токов замыкания, близких по величине к нагрузочным токам в «здоровых» обмотках, появлением значительного тока в нейтрали и потока нулевой последовательности, замыкающегося вне магнитопровода.

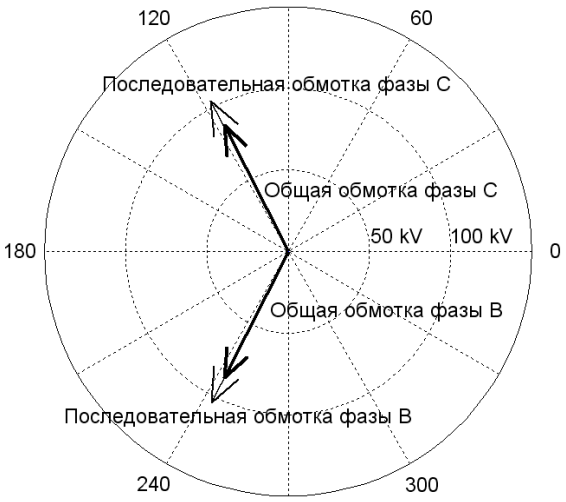


Рис. 3. ВД напряжений обмоток при к.з. фазы А на землю

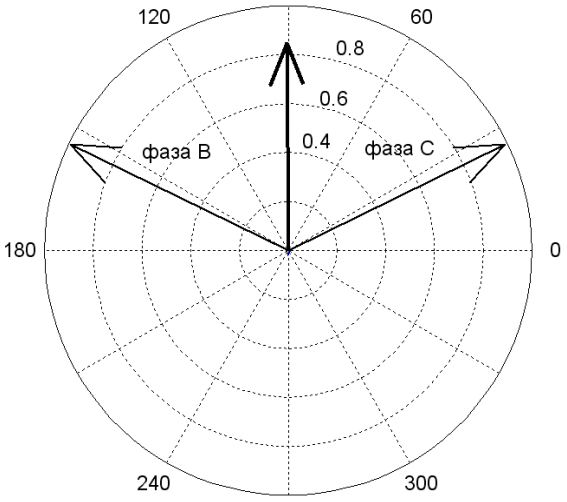


Рис.4. ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях и суммарного потока в воздухе

Рассмотрим далее особенности этого же режима при наличии симметричной нагрузки близкой к номинальной на стороне СН. В таблице 3 приведены полученные значения токов и напряжений обмоток, а на рис. 5-7 - построенные по полученным данным ВД. Напряжения обмоток, как следует из сравнения данных таблиц 2,3 и ВД рис.3,5 несколько падают по модулю вследствие влияния токов нагрузки, и, кроме того, незначительно сдвигаются по фазе друг относительно друга. На рис.6 приведена построенная по данным таб. 3 ВД токов обмоток, которые значительно изменяются по фазе и величине при появлении нагрузки. Токи в закороченных на землю последовательной и общей обмотках фазе А, как и следовало ожидать, одинаковы и практически не изменились при появлении нагрузки. Однако заметно изменились величины токов в обмотках фаз В и С, которые увеличились приблизительно в 2 раза в фазе С последовательной обмотки и уменьшились в той же фазе общей обмотки и, наоборот, увеличились в общей обмотке фазы В и, соответственно, уменьшились в последовательной обмотке той же фазы. Таким образом, в некоторых обмотках токи в данном режиме могут значительно превышать номинальные. На рис.7 приведена ВД магнитных потоков для данного случая, которая практически мало отличается от предыдущего варианта. Отсюда следует, что токи нагрузки не оказывают существенного влияния на прохождение потока нулевой последовательности, однако

приводят к увеличению приблизительно в 2 раза сверх номинальных значений токов в некоторых обмотках АТ.

Таблица 3. *Токи и напряжения обмоток при обрыве фазы А и ее к.з. на землю со стороны АТ и наличии симметричной нагрузки.*

Обозначения обмоток		**Токи обмоток, А**		**Напряжения обмоток, В**	
		модуль	**Угол, град.**	**модуль**	**Угол, град.**
Последовательная обмотка	A	368	87.45	180.3	174.9
	B	189.6	169.9	1.036e+005	-118.2
	C	743.7	100.5	1.043e+005	115.9
Общая обмотка	A	368.1	87.73	180	-5.615
	B	811.7	71.78	8.594e+004	-120.8
	C	211.5	-18.16	8.652e+004	112.9

Как следует также из полученных данных, напряжение на закороченной обмотке фазы А остается равным 180 В, а ток в нейтрали увеличивается до значения 1170 А.

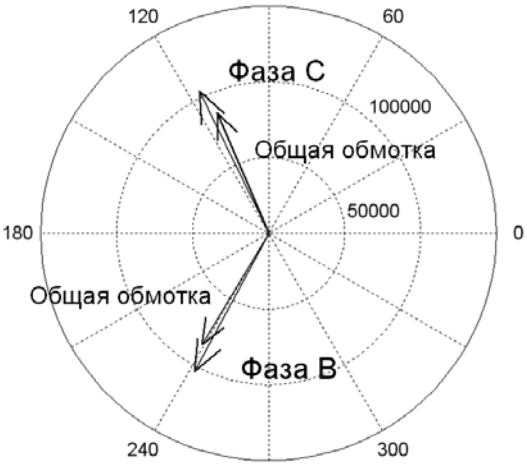


Рис. 5. Напряжения на обмотках при обрыве питания и замыкании фазы А (нагрузка подключена)

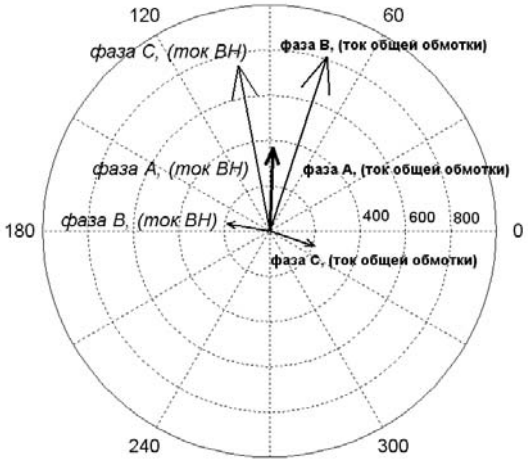


Рис.6. Распределение токов по обмоткам АТ при обрыве питания и замыкании фазы А (нагрузка подключена)

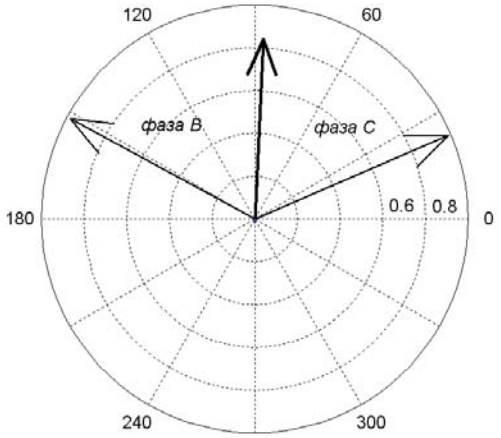


Рис. 7. Относительные значения магнитных потоков при наличии нагрузки

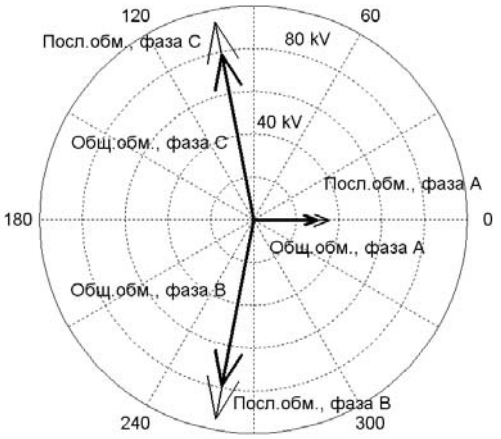


Рис. 8. Напряжения на обмотках АТ при обрыве фазы А, ее замыкании на землю со стороны АТ и разземлении нейтрали (нагрузка на стороне СН отсутствует)

Таким образом, обрыв фазы питающего напряжения со стороны ВН и ее замыкание на землю не приводит к возникновению в обмотках АТ сверхтоков такого порядка, как токи обычных к.з. Эти токи при отсутствии нагрузки на стороне СН даже меньше номинальных, а при наличии симметричной нагрузки, в некоторых фазах превышают номинальные в 1,5-1,7 раза. При этом также наблюдаются значительные токи в нейтральном проводе, превышающие 1000 А, что необходимо учитывать при выборе сечения заземляющего проводника.

Если по какой-либо причине соединение с заземляющим устройством нарушается, режим кардинально изменится. Рассмотрим более подробно режимы, аналогичные предыдущим, однако сопровождающиеся разземлением нейтрали АТ. В таблицах 4,5 приведены результаты расчета токов и напряжений обмоток для двух упомянутых режимов, а на рис. 6-9 приведены соответствующие ВД. Из данных табл. 4 следует, что в рассматриваемом режиме (при разземленной нейтрали и отсутствии нагрузки) АТ переходит в режим намагничивания, по обмоткам протекают только небольшие намагничивающие токи.

Таблица 4. *Токи и напряжения обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ (нагрузка на стороне СН отсутствует) и разземлении нейтрали АТ.*

Обозначения обмоток		**Токи обмоток, А**		**Напряжения обмоток, В**	
		модуль	**Угол, град.**	**модуль**	**Угол, град.**
Последовательная обмотка	A	3.312	-167.7	3.554e+004	-0.5061
	B	5.503	-177.6	9.465e+004	-100.8
	C	1.975	148.8	9.414e+004	100.9
Общая обмотка	A	2.966	-166.1	2.961e+004	-0.4973
	B	4.73	173.5	7.886e+004	-100.8
	C	0.9237	164.5	7.846e+004	100.9

Как видно из ВД напряжений обмоток, исходящих из точки нейтрали, показанной на рис.8., система напряжений обмоток искажена, а модули в «здоровых» фазах несколько ниже номинального напряжения, в закороченной фазе А напряжения обмоток более чем вдвое ниже номинальных значений. В данном режиме имеет место существенное увеличение потенциала нейтрали относительно земли, равное 65 кВ. Вследствие этого, несмотря на одинаковые фазовые углы напряжений самих обмоток, происходит фазовое смещение векторов напряжений на выводах ВН и СН автотрансформатора относительно земли, наглядно представленное на рис. 9.

Таблица 5. *Токи и напряжения обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ (имеется нагрузка на стороне СН) и разземлении нейтрали АТ.*

Обозначения обмоток		**Токи обмоток, А**		**Напряжения обмоток, В**	
		модуль	**Угол, град.**	**модуль**	**Угол, град.**
Последовательная обмотка	A	417.8	137.2	3.051e+004	-57.43
	B	510.7	-176.6	1.162e+005	-106.4
	C	810.8	124.5	7.914e+004	111.8
Общая обмотка	A	144.9	169.4	2.541e+004	-53.53
	B	416.6	76.5	9.429e+004	-108
	C	434.1	-84.03	6.658e+004	106.5

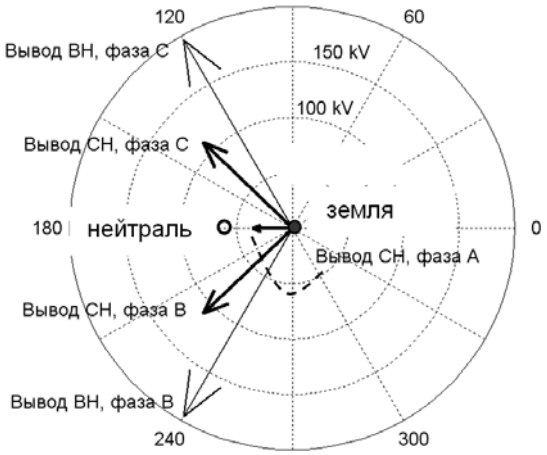


Рис.9. Напряжения на выводах ВН и НН АТ в режиме обрыва фазы А и ее к.з. на землю со стороны АТ при разземленной нейтрали (нагрузка отсутствует)

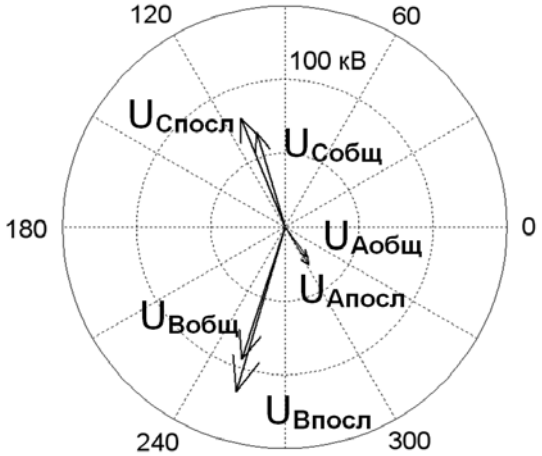


Рис. 10. Напряжения на обмотках АТ при обрыве фазы А, ее замыкании на землю со стороны АТ и разземлении нейтрали (есть нагрузка на стороне СН)

Там же показано положение нейтральной точки соединения обмоток. Таким образом, разземление нейтрали, как и следовало ожидать, приводит к значительному повышению ее потенциала относительно земли. Поток нулевой последовательности в этом режиме не возникает. Рассмотрим далее этот же режим при подключенной нагрузке на стороне СН. В таблице 5. представлены значения токов и напряжений обмоток для этого режима, сразу видно, что подключение нагрузки существенно его изменяет. Для анализа этого режима построены ВД на рис. 10- 14. Из сравнения рис. 8 и 10 видно, что подключенная нагрузка заметно изменяет картину напряжений на обмотках АТ, однако величины напряжений остаются приблизительно такими же. На рис. 11 приведена ВД токов в фазах последовательной (обозначены соответственно Ап, Вп и Сп) и общей обмоток АТ (обозначения приняты соответственно Ао, Во, Со). Видно, что системы токов последовательной и общей обмоток существенно несимметричны, причем заметно больше несимметрия на стороне ВН, а один из токов (Сп- ток последовательной обмотки фазы С) заметно превышает номинальное значение.

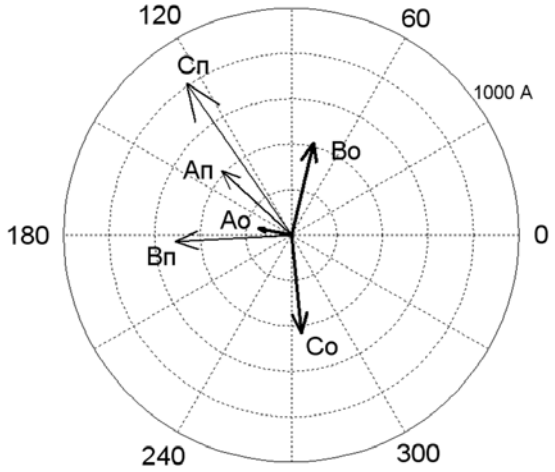


Рис.11. ВД токов в фазах последовательной (Ап, Вп и Сп) и общей (Ао, Во, Со) обмоток АТ

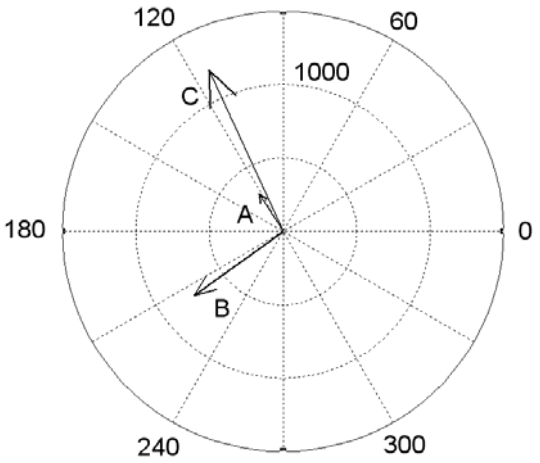


Рис. 12. ВД токов в фазах нагрузки (А, В и С) на стороне СН АТ общей (Ао, Во, Со) обмоток АТ

На рис. 12 приведена ВД токов в фазах нагрузки, которые также существенно несимметричны, и соответствуют токам обмоток на рис.11, т.е. ток нагрузки какой-либо из фаз равен геометрической разности векторов токов последовательной и общей обмоток соответствующей фазы. На рис. 13 приведена ВД магнитных потоков для данного режима. Видно, что, несмотря на разземленную нейтраль и отсутствие тока в нейтральном проводе, поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода и равный геометрической сумме векторов потоков во всех трех стержнях, имеет заметную величину и равен Φ_0.

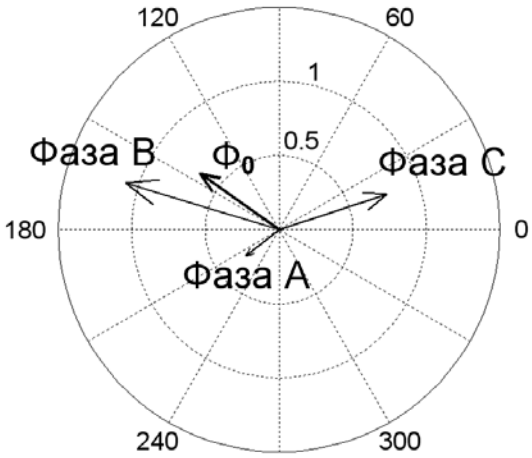


Рис.13. Относительные значения магнитного потока в стержнях и суммарный поток в воздухе Φ_0

ВЫВОДЫ.

1. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках трехфазного трехстержневого автотрансформатора в одном из особых несимметричных режимов, при обрыве одной из фаз питающего напряжения и ее одновременном коротком замыкании на землю со стороны АТ с учетом электромагнитной связи обмоток разных стержней, по этим данным построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов.
2. Рассмотренный особый режим с разрывом фазы питающего напряжения и ее одновременным замыканием на землю со стороны АТ при заземленной нейтрали характеризуется возникновением значительных токов во всех обмотках, такого же порядка, что и номинальные токи. Напряжения обмоток при этом изменяются незначительно по сравнению с номинальными величинами, за исключением закороченной фазы. Кроме того, возникает заметный поток нулевой последовательности, что может привести к дополнительному нагреву АТ.
3. При разземлении нейтрали в рассмотренном режиме его особенности связаны с наличием или отсутствием нагрузки на стороне СН. При отсутствии нагрузки реализуется режим намагничивания АТ с малыми токами и значительным смещением нейтрали. При наличии нагрузки, несмотря на отсутствие тока в нейтрали, появляется поток нулевой последовательности и токи в обмотках, сравнимые с номинальными. В общем случае, токи данного повреждения (как и в предыдущем случае) значительно меньше обычных токов к.з., и недостаточны для срабатывания релейной защиты, что может потребовать принятия дополнительных мер для защиты от подобных повреждений.

Литература.

[1] Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы. "Новости электротехники" №5 (53) 2008 г.

[2] В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Издательство Иркутского государственного университета, 2005 г. – 274 с. (стр 45 –модель трансформатора).
[3] Гусев А.С., Свечкарёв С.В., Плодистый И.Л. Универсальная математическая модель трёхфазных трансформаторов и авто- трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 77–81.
[4] Мартынов В.А. Несимметричные режимы работы силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y0. «Вестник ИГЭУ» Вып. 2, 2009 г, с. 1-5.
[5] Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора, Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4.
[6] Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). 2012. URL:http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/ powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings. html (дата обращения: 06.04.2012).
[7] URL: http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings. html (дата обращения: 20.09.2013).
[8] Бошняга В.А., Суслов В.М. Моделирование трехфазных трансформаторных устройств с трехстержневым магнитопроводом для инженерных расчетов несимметричных режимов при различных схемах соединения обмоток. Проблемы региональной энергетики, № 2(22), Кишинев, Академия наук Молдовы, Институт энергетики, 2013 г.
[9] Электротехнический справочник: в 3-х томах, Т.2. М, Энергоатомиздат, 1986, 712 стр. стр. 192-193.
[10] ABB_11_E_03_druck.pdf, стр. 88. http://www.dii.unipd.it/~gobbo/didattica/corsi/Componenti_tecnologie_elettrici/ABB_swithgear_manual_E11/ (дата обращения 04.04.2014)

Сведения об авторах:

Бошняга В.А., окончил Кишиневский политехнический институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988 г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств.
E-mail: **valeriu.bosneaga@gmail.com**

Суслов В.М., окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОГО ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Калинин Л.П., Голуб И.В., Зайцев Д.А., Тыршу М.С.
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. В связи с дальнейшим развитием объединенных энергосистем возрастают роль и значение фазорегулирующих устройств, обеспечивающих перераспределение потоков мощности в ветвях электрических сетей. При этом появляются новые технические решения, обеспечивающих реализацию этих управляющих воздействий, что влечет за собой необходимость сопоставления данной разработки с уже существующими устройствами. В работе рассматриваются технические характеристики двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства, которые в дальнейшем предполагается использовать для сравнения с другими конкурирующими разработками и оценки их технической эффективности.
Ключевые слова: Фазорегулирующий трансформатор, угол фазового сдвига, коэффициент трансформации, комплексный коэффициент преобразования, расчетная мощность устройства.

MODELAREA CARACTERISTICILOR INSTALAŢIEI DE REGLARE A DECALAJULUI DE FAZĂ CU DOUĂ TRANSFORMATOARELE

Calinin L., Golub I., Zaiţev D., Tîrşu M.,
Institutul de Energetică al AŞM, Republica Moldova

Rezumat. Datorită dezvoltării în continuare sistemelor energetice unificate, creşte rolul şi valoarea instalaţiilor de reglare a decalajului de fază ce asigură redistribuirea curenţilor de putere în ramurile reţelelor electrice. Totodată, apar noi soluţii tehnice care asigură realizarea efectului analogic de dirijare, ceea ce conduce la necesitatea comparării acestor elaborări cu instalaţiile deja existente. În lucrare se examinează caracteristicile tehnice ale instalaţiei de reglare a decalajului de fază cu două transformatoare, care se preconizează spre utilizare pe viitor în calitate de bază pentru comparaţie cu alte elaborări concurente şi estimarea eficienţei tehnice a lor.
Cuvinte-cheie: Transformator de reglare a decalajului de fază, unghiul decalajului de fază, coeficient de transformare, coeficient de transformare complex, puterea nominală a instalaţiei.

SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF DUAL-CORE PHASE SHIFTING TRANSFORMER

Calinin L., Golub I., Zaitsev D., Tirsu M.,
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The role and importance of phase shifting transformers are increased as a result of the further development of integrated power systems. This gives the rise to new technical solutions which entails the necessity of comparison of new developments with existing. The article consider the technical characteristics of dual-core phase shifting transformer which later will be used as a basis for comparison with other competing options and assess of their technical efficiency.
Keywords: Phase shifting transformer, phase shift angle, transformation ratio, comprehensive conversion factor

Введение

Задачи обеспечения эффективного управления установившимися и переходными режимами электроэнергетических систем остаются одними из наиболее актуальных. Их

решение может быть достигнуто различными способами, одним из которых является фазовое управление режимами на основе применения фазорегулирующих трансформаторов. Настоящая работа посвящена исследованию технических характеристик двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства, которое в дальнейшем предполагается использовать в качестве основы для сравнения с другими вариантами разрабатываемых фазоповоротных устройств.

1. Основные соотношения, характеризующие связь между входными и выходными величинами устройства

Наиболее широкое практическое применение в энергосистемах получил вариант фазорегулирующего устройства [1-5], схема которого представлена на рис.1. Основными элементами данного устройства являются два силовых трансформатора, один из которых выполняет функции намагничивающего (или параллельного), другой – функции фазосдвигающего (или последовательного) элемента. На схеме рис.1 обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора помечены индексом «p», обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора - индексом «q».

Схему электрических соединений устройства на стороне высокого напряжения характеризует рис.1а, схему электрических соединений на стороне низкого напряжения – рис.1б.

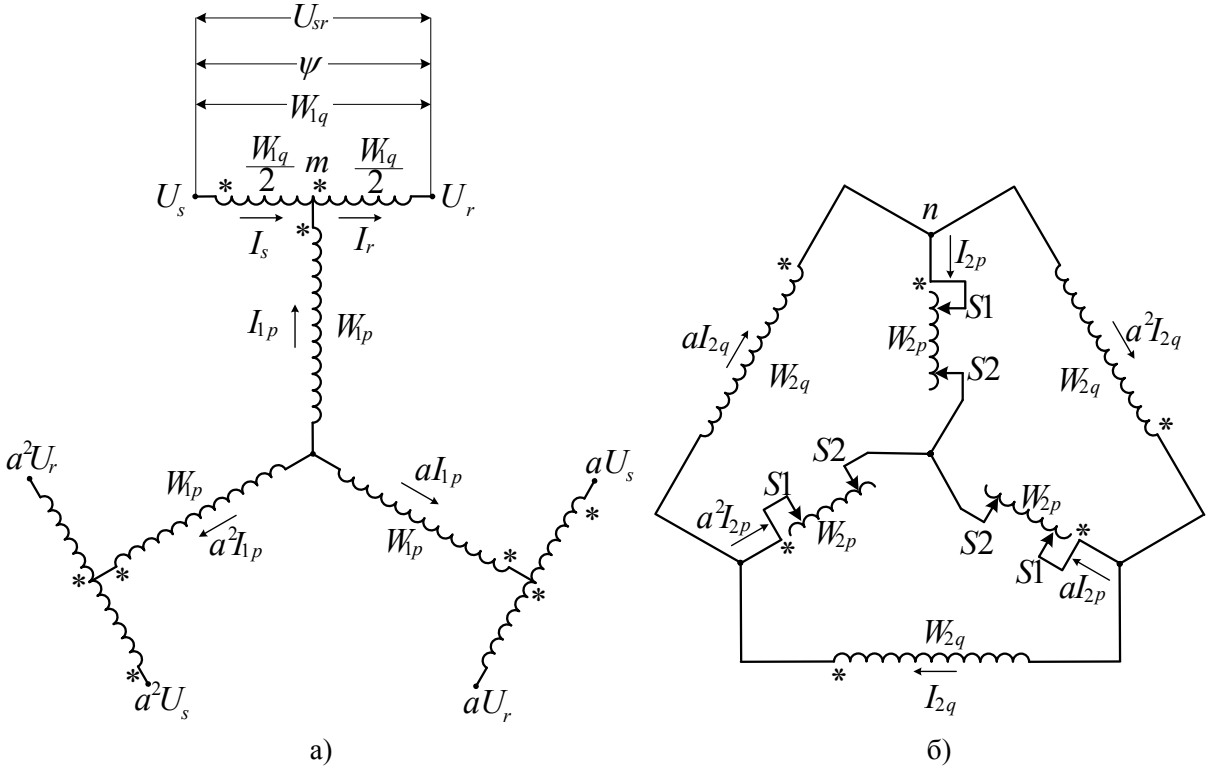


Рис.1. Схема двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства

Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_S осуществляется встречным перемещением контактов $S1, S2$

механизма переключения под нагрузкой по ответвлениям низковольтной регулировочной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора.

Высоковольтная обмотка фазосдвигающего трансформатора W_{1q} оборудована средней точкой «m», к которой подключается высоковольтный вывод обмотки W_{1p} намагничивающего трансформатора. Этим достигается достаточно высокая стабильность выходного напряжения по величине в процессе регулирования угла ψ.

При данных условиях уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора может быть записано следующим образом:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q} . \tag{1}$$

Ток вторичной обмотки фазосдвигающего трансформатора, получаемый из этого уравнения (1), характеризуется соотношением:

$$I_{2q} = \frac{1}{2k_q}\left(I_s + I_r\right), \tag{2}$$

где $k_q = \dfrac{W_{2q}}{W_{1q}}$ коэффициент трансформации.

При равенстве модулей входного и выходного напряжений, как это имеет место в рассматриваемом случае, будет обеспечиваться и равенство модулей входного и выходного токов нагрузки. Указанные токи будут отличаться только по фазе. Поэтому связь между токами I_s и I_r характеризуется следующим образом:

$$I_r = I_s e^{j\psi} . \tag{3}$$

Тогда выражение для токов вторичной обмотки (2) фазорегулирующего трансформатора приобретает вид:

$$I_{2q} = \frac{1+e^{j\psi}}{2k_q} I_s = \frac{1}{k_q}\cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s . \tag{4}$$

Модуль этого тока

$$\left|I_{2q}\right| = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q} I_s .$$

Здесь и в дальнейшем будем считать, что ток I_s совмещен с осью действительных значений. Это позволит выразить через него все токи в других элементах схемы фазорегулирующего трансформатора.

Далее определим характер изменения токов в обмотках намагничивающего трансформаторного элемента. Для узла «n» системы обмоток низкого напряжения можно записать:

$$aI_{2q} = I_{2p} + a^2 I_{2q} \tag{5}$$

Или

$$I_{2p} = \left(a - a^2\right) I_{2q} = j\sqrt{3} I_{2q} .$$

С учетом ранее установленного соотношения для тока I_{2q} (4) получим:

$$I_{2p} = j\frac{\sqrt{3}}{k_q}\cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s . \tag{6}$$

Модуль этого тока изменяется в соответствии с равенством:

$$\left|I_{2p}\right| = \frac{\sqrt{3}}{k_q}\cos\frac{\psi}{2} I_s .$$

Характер изменения тока I_{1p} в процессе регулирования угла ψ определим из уравнения баланса токов для узла «m» схемы соединения высоковольтных обмоток:

$$I_{1p} = I_r - I_s = \left(e^{j\psi} - 1\right) I_s = j2\sin\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s . \tag{7}$$

Модуль этой величины имеет следующее выражение

$$\left|I_{1p}\right| = 2\sin\frac{\psi}{2} I_s .$$

Коэффициент трансформации намагничивающего трансформаторного элемента является переменной величиной, которая при изменении взаимного расположения регулировочных контактов S_1 и S_2 может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Данная переменная величина может быть представлена следующим образом:

$$k_{pf} = k_y k_p , \tag{8}$$

где: k_{pf} изменяющийся при регулировании коэффициент трансформации намагничивающего элемента,

$k_p = \dfrac{W_{2p}}{W_{1p}}$ полное соотношение числа витков вторичной обмотки этого элемента относительно первичной,

k_y текущая координата управления, изменяющаяся в пределах от $k_y = -1$ до $k_y = 1$.

Тогда с учетом представленных выше значений токов I_{1p} и I_{2p} (6,7) можно записать:

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = \frac{2\sin\frac{\psi}{2}}{\sqrt{3}\cos\frac{\psi}{2}} k_q = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q tg\frac{\psi}{2},$$

или

$$tg\frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{k_p}{k_q} k_y = tg\frac{\psi_{\max}}{2} k_y, \qquad (9)$$

где

$$tg\frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{k_p}{k_q}.$$

Данное соотношение (9) определяет связь между k_q и k_p при заданных $\psi_{\max}$ и k_p

Таким образом, максимальный фазовый сдвиг определяется величинами k_p и k_q, а текущее значение угла ψ определяется значением k_y:

$$k_y = \frac{tg\frac{\psi}{2}}{tg\frac{\psi_{\max}}{2}}. \qquad (10)$$

Из рассмотренной схемы электрических соединений вытекают следующие уравнения связи между токами в элементах устройства:

$$\begin{gathered} I_{1p} = I_r - I_s, \\ I_{2q} = \frac{1}{2k_q}\left(I_s + I_r\right), \\ I_{2p} = j\sqrt{3} I_{2q} = j\frac{\sqrt{3}}{2k_q}\left(I_s + I_r\right), \\ I_{1p} = k_y k_p I_{2p} = jk_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}\left(I_s + I_r\right), \\ jk_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}\left(I_s + I_r\right) = I_r - I_s. \end{gathered} \qquad (11)$$

Последнее из этих уравнений позволяет выразить закон преобразования фазы тока на выходе устройства $\left(I_r\right)$ относительно тока на его входе $\left(I_s\right)$

$$I_r = \frac{1 + jk_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - jk_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}} I_s = \dot{K} I_s. \qquad (12)$$

Комплексный коэффициент преобразования $\dot{K}$ из (12) может быть разделен на действительную и мнимую составляющие:

$$\dot{K} = \cos\psi + j\sin\psi = \frac{1 - k_y^2 tg^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 tg^2 \frac{\psi_{\max}}{2}} + j\frac{2k_y tg \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 tg^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}. \qquad (13)$$

Мнимая составляющая $\left(j\sin\psi\right)$ этого коэффициента является нечетной функцией угла ψ и может быть использована для определения связи между коэффициентом k_y и углом ψ:

$$\sin\psi = \frac{2k_y tg \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 tg^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}.$$

Выражая это равенство относительно k_y и решая полученное квадратное уравнение, приходим к результату:

$$k_y = \frac{tg \frac{\psi}{2}}{tg \frac{\psi_{\max}}{2}}. \qquad (14)$$

Этот результат (14) совпадает с ранее полученным выражением связи между текущими значениями угла ψ и k_y (10), что подтверждает корректность выполненных преобразований.

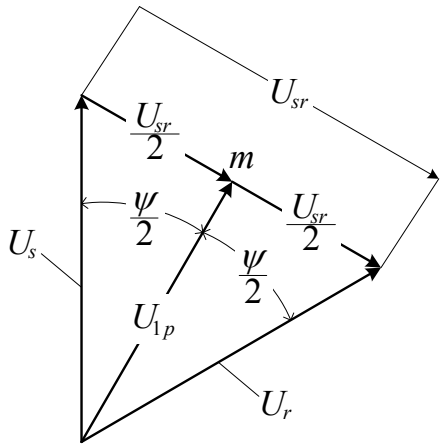


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений

Выше отмечалось, что одна из особенностей трансформаторного фазорегулирующего устройства состоит в том, что закон преобразования токов, осуществляемый устройством, полностью соответствует закону преобразования напряжений.

Проверим справедливость этого утверждения для рассматриваемого объекта.

На рис.2 изображена векторная диаграмма напряжений, позволяющая дать простейшее описание закона преобразования напряжений.

В соответствии с данной векторной диаграммой напряжение U_{1p} в точке «m» схемы соединения обмоток (рис.1) в процессе регулирования изменяется следующим образом:

$$U_{1p} = U_s \cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}}. \tag{15}$$

Напряжение U_{2p}, кроме того, подвержено регулированию с помощью контактов РПН и может быть представлено так:

$$U_{2p} = k_{pf} U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q tg\frac{\psi_{\max}}{2} \cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \tag{16}$$

Значение $k_{pf} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q tg\frac{\psi}{2}$ получено ранее (8) при рассмотрении связи между токами I_s и I_r.

Зная U_{2p}, можно выразить значение U_{2q}:

$$U_{2q} = j\sqrt{3} U_{2p} = jk_y k_q tg\frac{\psi_{\max}}{2} \cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \tag{17}$$

С другой стороны

$$U_{2q} = k_q U_{sr},$$

где U_{sr} напряжение между соответствующими входными (U_s) и выходными (U_r) клеммами устройства.

С учетом выше изложенного, напряжение U_{sr} приобретает следующую форму записи:

$$U_{sr} = j2\cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2} U_s. \tag{18}$$

Из векторной диаграммы рис. 2 также следует:

$$U_s + U_r = 2\cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s.$$

Тогда

$$U_{sr} = j\left(U_s + U_r\right) k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}.$$

В свою очередь

$$U_r = U_s + U_{sr} = U_s + j\left(U_s + U_r\right) k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}$$

или

$$U_r - k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}U_r = U_s + jk_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}U_s .$$

Выражая U_r через U_s, приходим к результату:

$$U_r = \frac{1 + k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - k_y tg\frac{\psi_{\max}}{2}}U_s = \dot{K}\,U_s . \qquad (19)$$

Это означает, что коэффициент преобразования по току (12) полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению (19).

Выполненный анализ позволяет представить следующие закономерности изменения токов и напряжений в элементах фазорегулирующего трансформатора.

Для возбуждающего элемента:

$$I_{1p} = 2\sin\frac{\psi}{2}I_s , \qquad U_{1p} = \cos\frac{\psi}{2}U_s ,$$
$$I_{2p} = \frac{\sqrt{3}}{k_q}\cos\frac{\psi}{2}I_s , \qquad U_{2p} = \frac{2}{\sqrt{3}}k_q\sin\frac{\psi}{2}U_s . \qquad (20)$$

Для фазосдвигающего элемента

$$I_{1q} = I_s , \qquad U_{1q} = 2\sin\frac{\psi}{2}U_s ,$$
$$I_{2q} = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q}I_s , \qquad U_{2q} = 2k_q\sin\frac{\psi}{2}U_s . \qquad (21)$$

Расчетная мощность каждого трансформаторного элемента определяется максимальными значениями токов и напряжений соответствующих обмоток.

Для возбуждающего элемента, согласно графика рис.3, максимальное значение тока $I_{1p(\max)}$ соответствует максимальному значению угла ψ, а максимального значение тока $I_{2p(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$. В то же время максимальное значение напряжения $U_{1p(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$, а максимальное значение напряжения $U_{2p(\max)}$ наступает при $\psi = \psi_{\max}$.

Отсюда расчетная мощность возбуждающего элемента S_p, определяемая как полу сумма расчетных мощностей обмоток, получает выражение:

$$S_p = \frac{U_{1p(\max)}I_{1p(\max)} + U_{2p(\max)}I_{2p(\max)}}{2} = \frac{2U_sI_s\sin\frac{\psi_{\max}}{2} + 2U_sI_s\sin\frac{\psi_{\max}}{2}}{2} = 2U_sI_s\sin\frac{\psi_{\max}}{2} . \qquad (22)$$

Для фазосдвигающего элемента значение тока I_{1q} в процессе регулирования остается неизменным $I_{1q} = I_{1q(\max)} = I_s = const$, а напряжение U_{1q} достигает своего максимума (U_s) при максимальном значении угла ψ. Максимальное значение тока $I_{2q(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$, а напряжение $U_{2q(\max)}$ также достигает своего максимума (U_s) при $\psi = \psi_{\max}$.

При этом расчетная мощность фазосдвигающего элемента получит следующее выражение:

$$S_q = \frac{U_{1q(\max)} I_{1q(\max)} + U_{2q(\max)} I_{2q(\max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin\frac{\psi_{\max}}{2} + 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{\max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{\max}}{2}. \quad (23)$$

Полная расчетная мощность устройства $(S_{ФРТ})$ является суммой расчетных мощностей его элементов

$$S_{ФРТ} = S_p + S_q = 4U_s I_s \sin\frac{\psi_{\max}}{2}. \quad (24)$$

2. Верификация технических характеристик устройства на основе применения Simulink – модели

На основе принципиальной схемы рис.1 в среде Simulink (Matlab) была создана комплексная модель устройства, позволяющая проводить различные расчетные эксперименты с измерением всех необходимых для анализа параметров во всех элементах устройства.

Для удобства проведения расчетных экспериментов каждый из трансформаторов устройства представлен в модели в виде группы однофазных трансформаторов.

Параметры каждого элемента были определены исходя из $U_s = U_r = 230V$ и номинального тока нагрузки $I_r = 12A$.

Построенная модель была использована для проведения ряда расчетных экспериментов. Были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания, а также ряд нагрузочных испытаний, которые позволили определить энергетические характеристики устройства.

Для обобщения получаемых в дальнейшем результатов, как мощность ФРТ, так и мощности отдельных элементов представлены через полную мощность нагрузки на выходе устройства, которая может быть выражена как $S_r = U_r I_r$, где S_r - величина, устанавливаемая на стадии проектирования. Так для фазосдвигающего элемента $\frac{S_q}{S_r} = 0,991$, для намагничивающего - $\frac{S_p}{S_r} = 0,952$. Таким образом типовая мощность устройства в $\frac{S_{ФРТ}}{S_r} = 1,94$ раз больше мощности нагрузки.

Для проверки положений, изложенных в первом параграфе, авторами исследования по результатам расчетных экспериментов были построены сравнительные характеристики рис.3-5. На рисунках приведены зависимости токов, напряжений в элементах устройства, а также мощности устройства от независимой координаты управления k_y, рассчитанные по выведенным выражениям (в виде

непрерывных линий), а также полученные в результате расчетных экспериментов на Simulink модели (в виде звездочек).

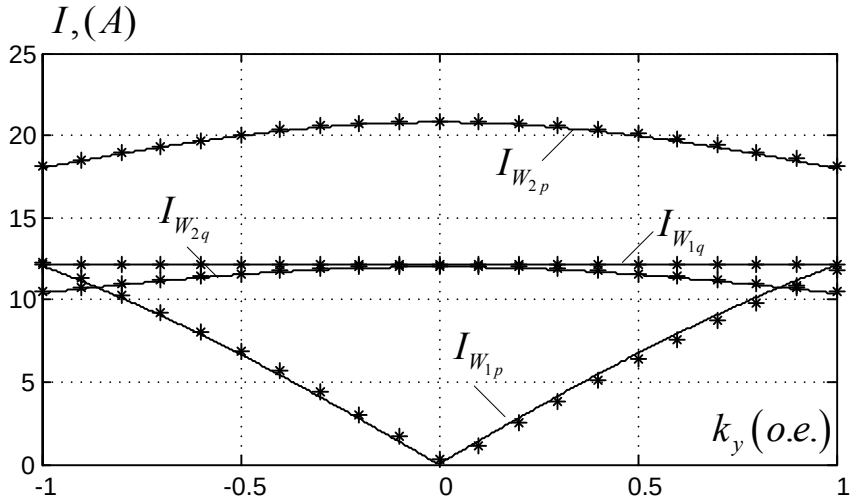


Рис.3. Характеристики токов в элементах устройства

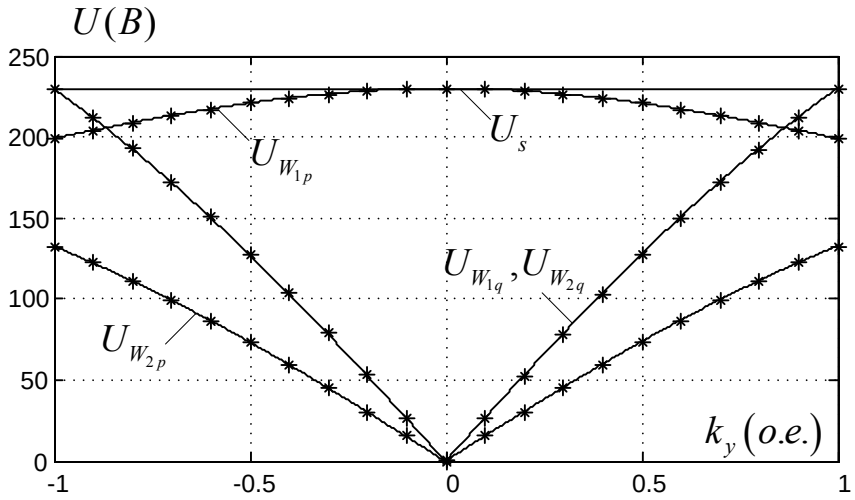


Рис.4. Характеристики напряжений на элементах устройства

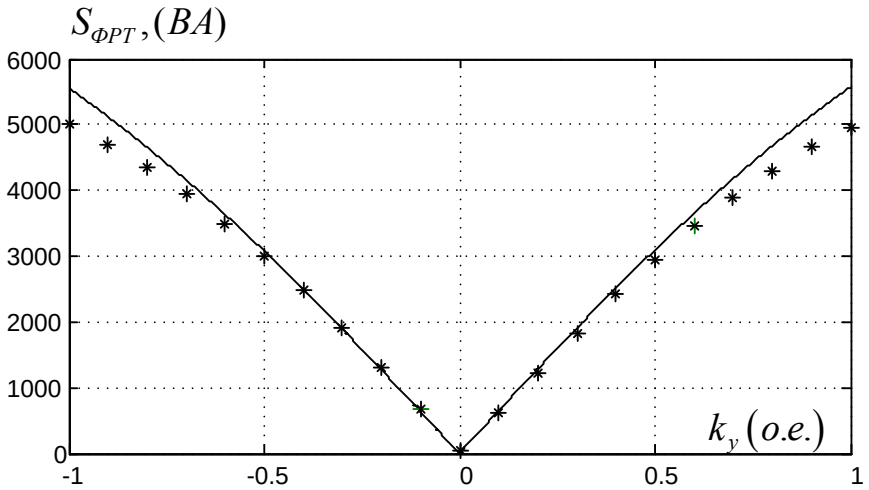


Рис.5. Характеристики мощности устройства

После анализа рис.3-5 можно констатировать совпадение результатов, полученных при исследовании устройства численным методом, так и на основе Simulink-модели, что говорит о корректности формирования первой.

Выводы

1. Получены уравнения, описывающие нормальный режим работы двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства в условиях регулирования фазового сдвига между входными и выходными электрическими величинами;
2. В среде Simulink (Matlab) создана комплексная модель устройства, на основе которой проведена серия расчетных экспериментов;
3. Проведен анализ изменения характерных параметров устройства в процессе регулирования угла фазового сдвига, который показал близость результатов полученных при различных видах моделирования;
4. Полученные результаты позволяют проводить сравнение данного варианта фазорегулирующего трансформатора с разрабатываемыми в перспективе техническими решениями.

Литература

[1] A.Kramer, J.Ruff, Transformers for Angle Regulation Considering the Selection of On-Loas Tap-Changers, IEEE transactions on power delivery, Vol.13, No.2, April 1998, Page(s):518-525.
[2] Luiz A. C. Lopes, Geza Joos, Boon-Teck Ooi, “A High-Power PWM Quadrature Booster Phase Shifter Based on a Multimodul AC Controller”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No.2, March 1998
[3] Жмуров В.,Стельмаков В.,Тарасов А., Гринштейн Б., Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением при больших углах регулирования фазового сдвига, Известия Академии Наук Энергетика,2010 №5, стр.132-141.
[4] Стельмаков В., Жмуров В., Тарасов А., Гринштейн Б., Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением, Энергетик 2010, №8, стр.20-23.
[5] W. Kling, D.Klaar, J. Schuld and other, Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity, CIGRE 2004, C2-207, 21, rue d’Artois, F-750.

Сведения об авторах:

Калинин Лев Павлович Окончил Одесский Политехнический Институт (Украина) в 1963 году. В 1982 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в НЭТИ г.Новосибирск (Россия). Область научных интересов связана с применением FACTS контроллеров в энергосистемах

Голуб Ирина Владимировна окончила Кишиневский политехнический институт в 1989 году. Область научных интересов связана с исследованиями режимов энергосистем, управляемых линий электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности

Зайцев Дмитрий Александрович. Окончил Кишиневский Политехнический Институт (Молдова) в 1985 году, Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в 2000 году в Институте Энергетики АН РМ. Научные интересы лежат в области исследования режимов энергосистем, содержащих гибкие межсистемные связи.

Тыршу Михаил Степанович. Окончил Технический университет Молдовы в 1994 году. По специальности «Автоматизация и управление техническими системами». В 2003 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук. Основные исследования проводит в области управления транспортными сетями, диагностики высоковольтного оборудования, силовой электроники и др.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РОБОТЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Шит М.Л., (Институт Энергетики АНМ), Школьник С.Г., Андреев Э.С., Карпов Э., Чистяков М. А., (лицей им. Рамбама, г. Кишинев)

Аннотация. Приведен обзор схем роботов, применяемых в электроэнергетике для диагностики состояния линий электропередач, для контроля кабельных линий, для контроля и обслуживания ветряных турбин, в атомной энергетике, для оптимальной ориентации на солнечных фотоэлектрических станциях и для очистки солнечных батарей. Приведены уравнения статики и динамики робототехнической тележки для подъема по гибкому канату, свободному в нижней точке. Приведена конструкция, выполненная на базе обучающего конструктора "Lego Mindstorms", для решения поставленной задачи.
Ключевые слова: Автономный мобильный робот, энергетика, подъем по гибкому канату.

ROBOŢII SPECIALIZAŢI PENTRU ENERGETICĂ

Şit M., (Institutul de Energetică al AŞM), Şcolnic S., Andreev Ă, Carpov Ă., Cisteacov M. (Liceul teoretic „Rambam” din Chişinău)

Rezumat. O prezentare generală a roboţii utilizate în energetică pentru diagnosticare de linii electrice, linii de cablu, pentru controlul, monitorizarea şi întreţinerea de turbine eoliene, în energie nucleară, pentru orientarea optimă a instalaţiilor solare fotovoltaice şi pentru curăţare a panourilor solare. Ecuaţiile de statica si dinamica a căruciorului robotic pentru ridicarea pe o frânghie verticală flexibilă, care este liberă în partea sa de jos. Este prezentată construcţie a căruciorului robotic pe baza constructor "Lego Mindstorms".
Cuvinte-cheie: Robot mobil autonom, energetică, ridicarea pe frânghie flexibilă.

SPECIAL ROBOTS FOR ENERGETICS

Sit M.L., (Institute of Power Engineering of the ASM), Shkolnik Sofia, Andreev E., Karpov E., Chisteakov M. (Lyceum ”Rambam”, Chisinau)

Abstract. An overview of robots used in the power industry for diagnostics of power lines, cable lines, for the control, monitoring and maintenance of wind turbines, in nuclear energy, for optimum orientation of solar photovoltaic plants and solar panels for cleaning. Equations of statics and dynamics of robotic car which lifts along the vertical flexible rope are considered. It is presented the design which is made on the basis of "Lego Mindstorms" to solve the problem.
Keywords: Autonomous mobile robot, energetics, vertical rope climbing.

Введение

Роботы применяются часто там, где работа человека связана с опасностью или, вообще, невозможна. С момента аварии на японской атомной станции Фукусима, был разработан ряд роботов, которые должны были оказать помощь в диагностике повреждений и ликвидации последствий аварии (http://www.dailytechinfo.org/robots/4986-roboty-zmei-nachinayut-vypolnyat-funkcii-inspektorov-obektov-atomnoy-energetiki.html).
Также, как известно, профилактика высоковольтных линий электропередачи является важной, но опасной задачей, которая требует прекращения распределения электроэнергии. Разработан робот под названием " Expliner" для автоматизации задач по контролю состояния ЛЭП. Этот робот движется по проводам линии, преодолевает препятствия, такие как прокладки и зажимы подвесок, и все это на высотах в десятки метров. При этом выполняются такие работы, которые человек не может выполнить. Робот выполнен с переменным центром тяжести, что облегчает маневрирование при преодолении препятствий. Робот регистрирует информацию, поступающую по GPS, что позволяет определять координаты поврежденных мест. Применение робота позволяет выявить аномалии в виде ржавчины, дефектов, повреждения поверхности, или изменений диаметра линии, которые могут свидетельствовать о внутренней коррозии.

Реальная задача подъема по вертикальной цилиндрической опоре поставлена в [7]. В предлагаемом устройстве робот инспектирует состояние ветряных турбин (рис.1).

Рис.1. Схема робота для инспектирования состояния ветровых турбин

Рис.2. Робот для инспектирования высоковольтных линий электропередач [12]

Рис.3. Робот для проверки состояния ЛЭП [13]

Канадский Hydro-Québec Research Institute начал проект, который был спровоцирован ледяным дождем, прошедшим в северной Америке в 1998 г. который привел к мощным перерывам в подаче электроэнергии и оставил миллионы людей без электричества на несколько дней. Была поставлена задача разработать робот, который бы перемещался по линиям электропередач и удалял бы лед с проводов. Первым решением был робот с захватами, подобным лапам ленивца, и снабженным устройством для удаления льда. В последнем варианте робот уже снабжен видеокамерами для контроля состояния линии и инфракрасным датчиком для контроля температур проводов, и был испытан на ЛЭП с током 2000 А и напряжением 735 кВ).

Рис.3. Робот для чистки солнечных панелей
[http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/11/the-key-to-cheap-renewable-energy-robots/281139/]

Робот для чистки солнечных панелей использован ночью для чистки солнечных фотовольтаических панелей, что повышает эффективность панелей на 15%. Это изделие особенно необходимо в условиях пустынного климата, где панели может занести песком полностью за 100 дней эксплуатации. В Германии робот, который называют Momo, используется для поворота панелей при слежении за солнцем, что оказывается дешевле, чем делать следящие системы для каждой панели.

В 1999 г. появилось сообщение о мобильных роботах для использования на атомных электростанциях [21]. Разработанный робот двигался по заданной траектории, был снабжен телекамерой. Компания AREVA, занимающаяся обслуживанием ядерных реакторов и разработкой оборудования для АЭС, начала использовать новаторскую технологию для первой в своем роде проверке изнутри первичного контура реактора АЭС в США с помощью дистанционно управляемого робота. Во время недавнего останова оборудования на одной из американских АЭС, AREVA провела осмотр первичного контура реактора при помощи очень сложного «SUSI» робота. Этот небольшой, с дистанционным управлением робот, напоминающий субмарину, произвел осмотр реактора изнутри, а также проверил компоненты реактора с помощью ультразвукового и

визуального тестирования. По результатам, в том числе этих исследований, было вынесено решение о длительном продлении срока эксплуатации обследуемого реактора.

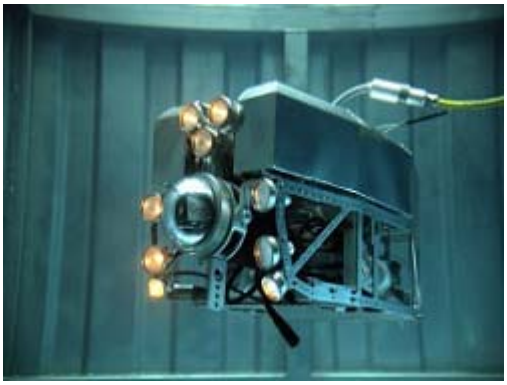


Рис. 4. Робот для обследования атомных реакторов
(http://alades.livejournal.com/1479962.html)

Впервые компания AREVA начала использовать робота «SUSI» на рынке Германии и уже широко используют по всей Европе. Теперь «SUSI» технология будет адаптироваться в соответствии с требованиями американских атомных электростанций. Американская компания iRobot предоставила Японии четыре робота для ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Оснащённый необходимым оборудованием робот PackBot уже исследовал аварийные блоки станции и взял радиационные пробы в первом и третьем реакторах. Позже к ликвидации последствий планируют привлечь более крупного и крепкого робота Warrior 710. (http://vk.com/video-52374918_166796558)

В http://www.ee.washington.edu/research/seal/pubfiles/2004912918.pdf сообщается о роботе, предназначенном для исследования кабельных систем различного назначения.

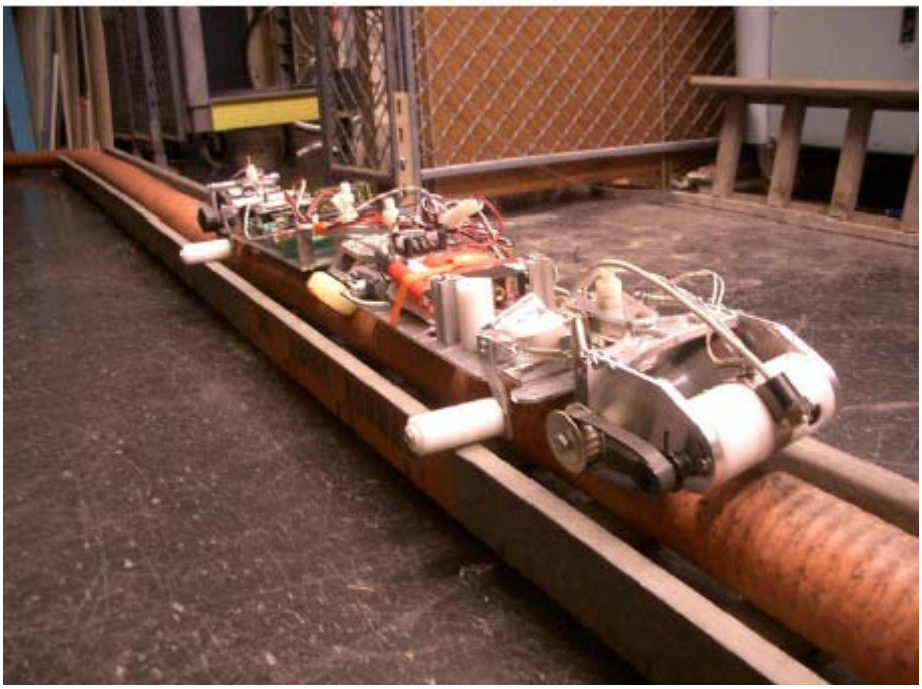


Рис.5. Робот для контроля кабельных линий
(http://www.ee.washington.edu/research/seal/pubfiles/ICMA_2005_Proc.pdf)

В [17] предлагается робот для очистки *лопастей* ветроустановки, который позволит избавиться от опасного и тяжелого физического труда при выполнении работ по чистке ветроустановок. В [http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/10093/doc.pdf] также сообщается о роботе для инспекции ЛЭП. При спасательных работах может возникнуть ситуация, когда необходимо подняться по вертикальному канату и доставить (или забрать) груз. Важность этой проблемы подчеркнута американским правительством при объявлении программы DARPA Robotics Challenge, см. http://2045.ru/news/29747.html со ссылкой на http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/darpa-robotics-challenge-here-are-the-official-details. Известны задачи, связанные с движением робототехнических тележек (РТ) по канату [1-5]. Так, в [5, 6] приведена схема работа, где контроллер связан с лебедкой, которая, наматывая канатик на вал лебедки, поднимается по веревке. Впервые задача подъема робототехнической тележки по канату была поставлена в робототехническом обществе Сиэттла (США) [5] в 2010 году и опубликована на сайте международного общества по робототехнике LUGNET. После этого появились решения этой задачи [2-5]. Однако, до настоящего времени не была разработана теория подъёма РТ по канату, а также задача подъёма на качающийся канат. Также на сайтах [5, 6, 10] в 2010...2014 гг. была поставлена задача подъема по канату за минимальное время для олимпиад по робототехнике.

2. Разработка варианта прототипа тележки для движения по вертикальному канату

Для движения по вертикальному канату известны захваты в виде рычагов, а также в виде резиновых колес. Нами рассмотрен для прототипа упругий захват, который может быть выполнен из изделия типа автомобильной шины. Две автомобильные шины охватывают канат с двух сторон (рис.6). За счет регулирования угла охвата шинами каната, расстояния между осями колес и давления в шинах обеспечивается необходимое сцепление шин с канатом. Условием равномерного движения по канату является превышение сил сцепления с канатом силы веса тележки.

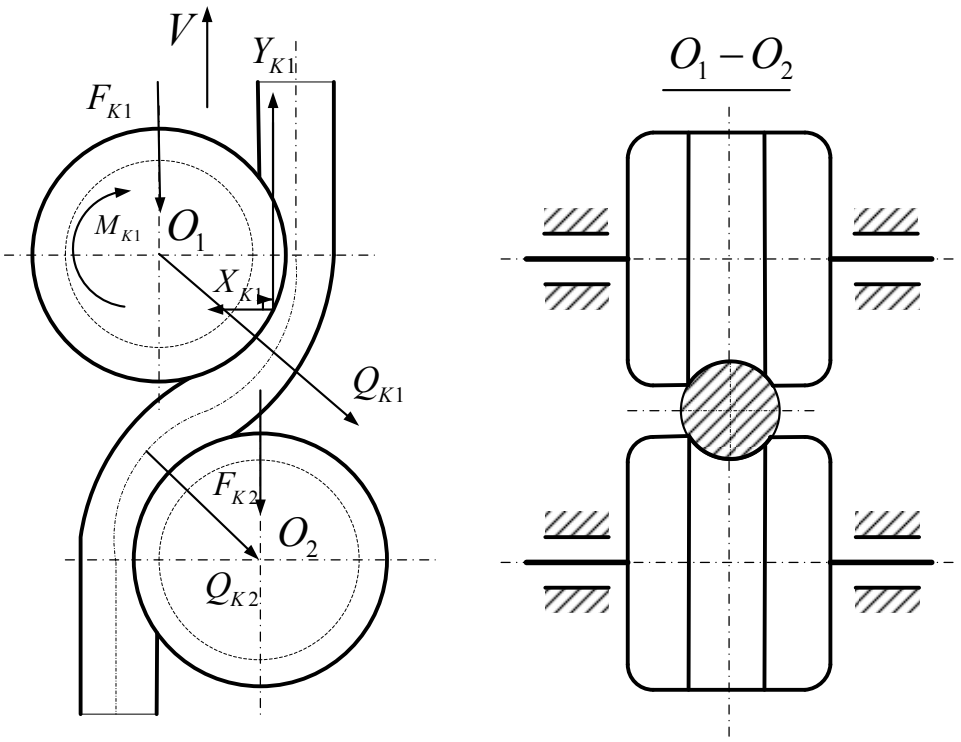


Рис.6. Схема захвата троса

Последующий материал написан по схеме, изложенной в [19]. Движение тележки обеспечивается за счет силы тяги, создаваемой колесным движителем, который приводится в действие электрическими двигателями, установленными на тележке. Внешним телом в системе «тележка–канат» является канат. Из числа внутренних сил основное влияние на условия движения оказывает крутящий момент движителей и сопротивления в элементах конструкции, передающих крутящий момент к ведущим колесам. Наличие внутренних сопротивлений обуславливает потери энергии в механизмах, из-за которых уменьшается энергия, используемая для преодоления внешних сопротивлений. Внешними силами в рассматриваемом случае будут являться силы, приложенные непосредственно к остову тележки, а именно: сила тяжести (вес тележки), приложенная к центру масс (инерции) тележки; реакция каната, передаваемая на остов через ходовую систему. Для случая неравномерного движения тележки, при составлении уравнений движения на основании принципа Даламбера, к внешним силам относим также силу инерции тележки, приложенную к ее центру масс. Таким образом, внутренние силы не влияют на движение центра масс (центра инерции) тележки как системы; только внешние силы, т.е. силы действия внешних тел на тележку могут изменить ее движение. Чтобы представить себе движение тележки и работу ее движителя в целом, необходимо предварительно рассмотреть качение отдельного колеса и найти основные зависимости между факторами, определяющими условия качения. Эти зависимости могут быть силовыми, связывающими силы и моменты, приложенные к колесу, так и кинематические, связывающие угловую скорость колеса ω_K со скоростью его поступательного движения. Прежде чем рассматривать внешние силы и моменты, действующие на тележку при ее движении, рассмотрим основные кинематические характеристики и зависимости, связанные с работой колеса. Так как изучается прямолинейное движение тележки, то рассмотрим движение колеса только в одной плоскости - продольной, которая перпендикулярна к опорной плоскости, причем, примем, что плоскость вращения колеса совпадает с продольной плоскостью. Рассмотрим сначала действительные процессы, происходящие при работе колеса. На рис. 6 показана схема внешних сил и реакций, действующих на колесо при его качении по канату. При этом мысленно отбросим внешнее тело, взаимодействующее с колесом: остов тележки. Действие отброшенного остова тележки на рассматриваемое колесо представлено на схеме: нормальной нагрузкой на колесо $Q_{K1}(Q_{K2})$ (с учетом веса колеса); реакцией $F_{K1}(F_{K2})$ толкающей силы оси колеса на остов тележки (эта реакция направлена в тяговом режиме против направления поступательного движения колеса); ведущего момент $M_{K1}(M_{K2})$, передаваемого на колесо от электродвигателей. Действие отброшенной поверхности пути (троса) заменено: нормальной реакцией $X_{K1}(X_{K2})$ опорной поверхности на колесо; продольной реакцией $Y_{K1}(Y_{K2})$ опорной поверхности, направленной в сторону поступательного движения колеса. Продольная реакция $Y_{K1}(Y_{K2})$ является активной силой, поэтому она называется толкающей силой ведущего колеса [19]. При неравномерном относительном вращении колеса на колесо также действует момент касательных сил инерции, равный произведению момента инерции колеса J_K на угловое ускорение (замедление) колеса $M_{JK} = J_K \cdot \dfrac{d\omega}{dt}$. Кроме того, при неравномерном переносном поступательном движении колеса возникают силы инерции, равнодействующая которых равна $P_{JK} = m_K \cdot dv / dt$.

2.3. Описание конструкции

Привод переднего колеса тележки (оно же и ведущее колесо захвата) (рис.7) осуществляется от двух моторов, привод заднего колеса захвата осуществляется от отдельного привода через редуктор с передаточным отношением равным единице. Задняя пара колес тележки – ведомая. Колеса большого диаметра, установленные выше контроллера, служат для "мягкой" посадки машины при ее спуске с троса. Перед машиной установлены ограничительные пластины, которые служат для ограничения возможных колебаний каната и успокоения этих колебаний. При подъезде тележки к канату срабатывает фотоэлектрический датчик, происходит захват каната движителями, и электрические моторы (приводы движителей) начинают работать синхронно на подъем тележки (синхронизация моторов с целью обеспечения одинаковой скорости их вращения обеспечивается программно). Данная конструкция является наиболее близкой по принципу действия к описанной в [2] и отличается от нее большей скоростью подъема и возможностью подъема на качающийся канат.

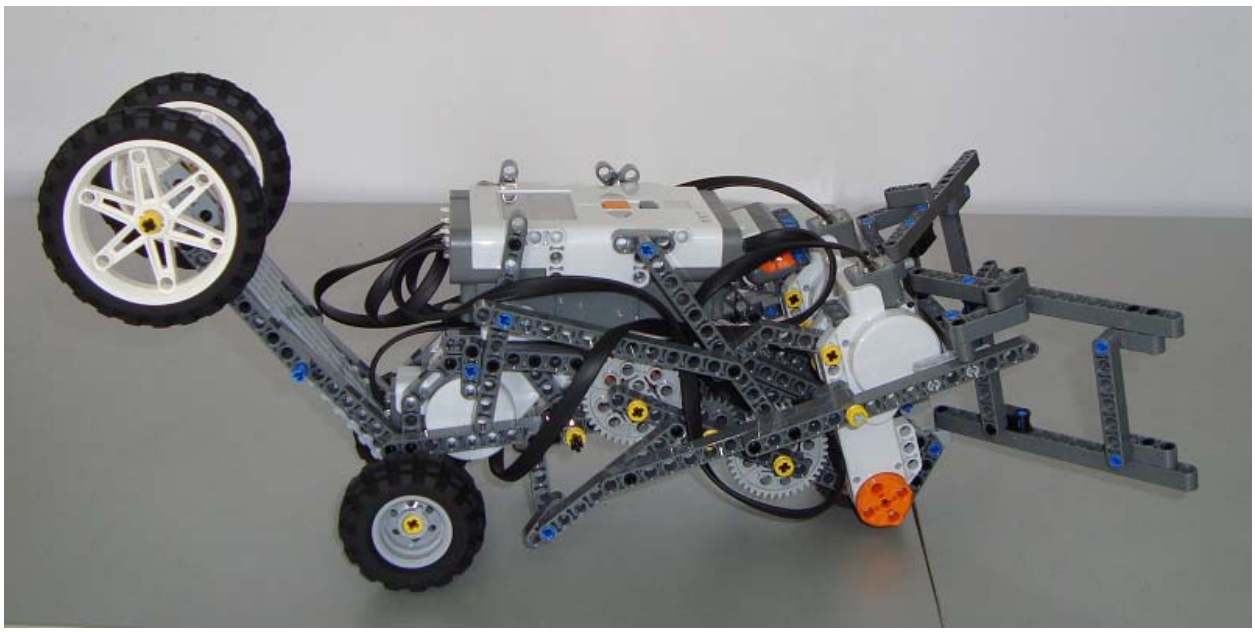


Рис.7. Робототехническая тележка для подъема по канату

Выводы

1. Общим для роботов, применяемых в энергетике, является наличие тележки, которая перемещается как с помощью магнитных присосков по металлическим колоннам энергоустановок, так и с помощью колес, катящихся по проводам линий электропередач.
2. Приведена схема захвата в виде пары резиновых шин, в которых регулируется давление, с целью обеспечения подъема тележки по вертикальному канату.
3. Приведен макет технического решения для плавной установки машины на горизонтальную поверхность при ее спуске по канату.
4. Показано, как спроектировать робота в рамках проекта "Lego Mindstorms" для подъема по вертикальному, закрепленному только сверху, канату.

Литература

[1] http://ncostaengineering.weebly.com/rope-climber.html
[2] http://www.youtube.com/watch?v=Cv_xlV0Df7Q
[3] http://www.youtube.com/watch?v=gi7GesmY16w&feature=related

[4] http://www.youtube.com/watch?v=bMmAUnka_MA&feature=related
[5] http://www.lugnet.com/org/us/smart/~48/ideas/past_challenges_long
[6] http://www.lugnet.com/org/us/smart/~48/ideas/complete_list
[7] http://technicallylearning.org/uploads/RobotOlympics.pdf
[8] http://www.treehugger.com/renewable-energy/new-rope-climbing-robot-inspects-wind-turbines-better-than-humans.html
[9] http://www.robotee.com/index.php/2013/04/
[10] http://www.railab.ru/tekushchie-reglamenty.html
[11] http://www.youtube.com/watch?v=nWOfQeiWylM
[12] http://www.houseofjapan.com/robots/high-voltage-line-inspection-robot
[13] http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/linescout-robot-climbs-on-live-power-lines-to-inspect-them
[14] http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/4129/1/12612290_Cable%20Climbing%20Robot.pdf
[15] Bing Jiang, Alanson P. Sample, Ryan M. Wistort and A. V. Mamishev, Autonomous Robotic Monitoring of Underground Cable Systems. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada • July 2005. pp.673-679. http://www.ee.washington.edu/research/seal/ pubfiles/ICMA_2005_Proc.pdf
[16] http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Maintenance_robot_for_wind_power_blade_cleaning.pdf
[17] Bing Jiang, A. Mamishev, Robotic Monitoring of Power Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, NO. 3, July 2004б p. 912-018.
[18] M. Nayyerloo, XiaoQi Chen, Wenhui Wang, and J .G. Chase, Cable-Climbing Robots for Power Transmission Lines Inspection. http://www.intechopen.com/books/mobile-robots-state-of-the-art-in-land-sea-air-and-collaborative-missions/cable-climbing-robots-for-power-transmission-lines-inspection.
[19] Савочкин В.А. Тяговая динамика колесного трактора. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности “Автомобиле – и тракторостроение“. – М.: МГТУ “МАМИ”, 2005. – 97 с.
[20] N. Kita, A.J. Davison, Mobile sensing robots for nuclear power plant inspection. Advanced Robotis, 1999, Vol.13, N3, pp. 355-356.
[21] Zhenmao Chen and Kendzo Miya Detection and sizing of defects in structural components of a nuclear power plant by ECT. Review of Quantitative Nondistructive Evaluation Kit. Vol.25, 2005, pp.789-796.

Сведения об авторах.

Шит Михаил Львович – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» Института энергетики АН Молдовы. Область научных интересов: робототехника, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, в промышленности, в сельском хозяйстве, тепловые насосы. E-mail: mihail_sit@mail.ru

СТЕГАНОПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБЛАСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ-КОНТЕЙНЕРА, УСТОЙЧИВОЕ К АТАКАМ ПРОТИВ ВСТРОЕННОГО СООБЩЕНИЯ

[1]Кобозева А.А., [1]Лебедева Е.Ю., [2]Костырка О.В.
[1]Одесский национальный политехнический университет, Украина
[2]Академия пожарной безопасности им.Героев Чернобыля, Украина

Аннотация. Одним из основных требований, предъявляемых к стеганоалгоритму при его разработке, является требование устойчивости к возмущающим воздействиям – атакам, направленным против встроенного сообщения. Показано, что обеспечение устойчивости стеганоалгоритма не зависит от того, в какой области контейнера, в качестве которого рассматривается цифровое изображение, – пространственной или преобразования (частотной, области сингулярного, спектрального разложения матрицы изображения и др.) происходит погружение дополнительной информации. Учитывая существующие преимущества пространственной области изображения для организации процессов погружения/декодирования информации, в работе получено формальное достаточное условие обеспечения устойчивости такого стеганопреобразования. Показано, что коррекция яркости пикселей блока контейнера на одно и то же значение аналогична коррекции максимального сингулярного числа соответствующей матрицы блока при погружении дополнительной информации, которая гарантирует устойчивость к атакам против встроенного сообщения. Получены рекомендации по выбору размера блока l контейнера, задействованного в стеганопреобразовании, как одного из параметров, определяющих величину вычислительной погрешности в стеганосообщении. С учетом обратно пропорционального соответствия между величинами скрытой пропускной способности организуемого стеганографичекого канала связи и размером блока рекомендовано l=8.
Ключевые слова: Стеганографический алгоритм, устойчивость, атака против встроенного сообщения, пространственная область, цифровое изображение.

STEGANOTRANSFORMARE A REGIUNII SPAŢIALE A IMAGINEI – CONTAINER, REZISTENTĂ IMPOTRIVĂ ATACURILOR CONTRA MESAJULUI INCORPORAT

[1]Cobozeva A.A., [1]Lebedeva E.Iu., [2]Costârca O.V.
[1]Universitatea Naţională politehnică din Odesa, Ucraina
[2]Academia securităţii antiincendiare Eroii Cernobil, Ucraina

Rezumat. Una dintre cele principalele cerințele pentru steganoalgoritmul in procesul elabrării, este cerinţă de rezistenţă la perturbații – atacurilor îndreptate împotrivă mesajului încorporat. Se demonstrează că stabilitatea steganoalgoritmului nu depinde de faprul, în ce regiune a containerului, care este considerat ca o imagine digitală, - o transformare spaţială sau o imersiune se produce imersiune a informaţii suplimentare. Având în vedere avantajele existente a regiunii spaţiale de container legatre cu organizarea proceselor de imersie/decodare a informației, în lucrare sunt obținută condiție formală suficientă pentru asigurarea stabilităţii unei astfel de steganotransformare. Se demonstrează, că corectarea luminozității a pixelelor ai blocului containerului pe aceeași valoare este similară cu corectarea numărului maximal singular al matricei-bloc corespunzătoare la imersie informației suplimentare, care garanteză stabilitatea impotrivă atacurile contra mesajului încorporat. Sunt obţinute recomandările privind alegerea dimensiunii l a containerului, implicat în steganotransformare, ca unei din parametrii, care determină valoare erorii de calcul în steganomesajul. Având în vedere concordanţă între capacităţilor latente de canal steganographic și mărimea blocului este recomandată l=8.
Cuvinte–cheie: Algoritmul steganofrafic, stabilitatea, atacul impotrivă imaginei incorporate, imagine digitală.

STEGO TRANSFORMATION OF SPATIAL DOMAIN OF COVER IMAGE ROBUST AGAINST ATTACKS ON EMBEDDED MESSAGE

[1] A. Kobozeva, [1]E. Lebedeva, [2]O. Kostyrka
[1]Odessa National Polytechnik University, Ukraine
[2]Academy of Fire Safety named after Chernobyl Heroes, Ukraine

Abstract. One of the main requirements to steganografic algorithm to be developed is robustness against disturbing influences, that is, to attacks against the embedded message. It was shown that guaranteeing the stego algorithm robustness does not depend on whether the additional information is embedded into the spatial or transformation domain of the cover image. Given the existing advantages of the spatial domain of the cover image in organization of embedding and extracting processes, a sufficient condition for ensuring robustness of such stego transformation was obtained in this work. It was shown that the amount of brightness correction related to the pixels of the cover image block is similar to the amount of correction related to the maximum singular value of the corresponding matrix of the block in case of embedding additional data that ensures robustness against attacks on the embedded message. Recommendations were obtained for selecting the size l of the cover image block used in stego transformation as one of the parameters determining the calculation error of stego message. Given the inversely correspondence between the stego capacity of the stego channel being organized and the size of the cover image block, l=8 value was recommended.

Keywords: Stego algorithm, robustness, attack against the embedded message, spatial domain, digital image.

1. Введение

Стремительный рост арсенала технических средств и систем, предназначенных для приема, передачи, обработки и хранения информации, происходящий сегодня повсеместно в учреждениях и организациях всех форм собственности, обусловлен стремительно нарастающим потоком информации, вызванным научно-техническим прогрессом. Физические процессы, происходящие в таких технических устройствах при их функционировании, создают в окружающем пространстве побочные электромагнитные, акустические и другие излучения, которые в той или иной степени связаны с обработкой информации [1]. Подобные излучения могут использоваться злоумышленниками, пытающимися получить доступ к секретной или конфиденциальной информации. Физические явления, лежащие в основе появления излучений, имеют различный характер, тем не менее, в общем виде утечка информации за счет излучений может рассматриваться как непреднамеренная передача секретной информации по некоторой «побочной системе связи». В силу этого необходимым является обеспечение дополнительной защищенности информации в условиях ее возможной утечки, для чего эффективными являются стеганографические методы [1-6].

В настоящий момент стеганография переживает этап своего бурного развития, связанный с многими объективными и субъективными причинами, среди которых ограничение и даже запрет на законодательном уровне в некоторых странах мира использования криптографии. В процессе стеганографирования конфиденциальная информация после предварительного кодирования, результатом которого является дополнительная информация (ДИ), погружается в контейнер, или основное сообщение (ОС), в качестве которого в работе рассматривается цифровое изображение (ЦИ), результатом чего является стеганосообщение (СС). СС открыто пересылается по каналу связи.

При разработке новых и усовершенствовании существующих стеганографических алгоритмов остро встают вопросы обеспечения ими различных требований, среди которых одним из основных является требование устойчивости алгоритма к различным возмущающим воздействиям – атакам, направленным против встроенного сообщения. К

таким воздействиям относятся, в частности, наложение различных шумов на СС, фильтрация, сжатие СС с потерями и др. [4,7,8].

На протяжении долгого времени считалось, что для обеспечения помехоустойчивости стеганографических алгоритмов предпочтительной для погружения ДИ является область преобразования изображения [4,5,8-10], в частности, частотная область. В результате современных научных изысканий было показано, что обеспечение устойчивости стеганоалгоритма не зависит напрямую от того, в какой области контейнера – пространственной или преобразования происходит процесс погружения ДИ [2,3], который будем называть стеганопреобразованием (СП). Любые изменения, происходящие при погружении ДИ в любой области контейнера (пространственной, области преобразования) однозначно отражаются в виде определенных изменений в других областях (преобразования, пространственной), приводящих к тем же результатам, касающимся устойчивости СП. При этом пространственная область обладает рядом преимуществ при организации СП, в частности, процесс погружения/декодирования ДИ в пространственной области ЦИ имеет меньшую вычислительную сложность, приводит к меньшему накоплению вычислительной погрешности за счет отсутствия дополнительной обработки контейнера, стеганосообщения.

Таким образом, пространственная область изображения-контейнера при разработке стеганоалгоритмов, устойчивых к возмущающим воздействиям, на сегодняшний день незаслуженно «отодвинута на второй план». Среди причин этого отсутствие до настоящего момента формальных достаточных условий обеспечения такой устойчивости для СП в пространственной области ЦИ; более простая реализации существующих достаточных условий в областях преобразования при организации погружения ДИ.

Все это оставляет *актуальной* задачу разработки эффективных в условиях активных атакующих действий СП в пространственной области контейнера-изображения.

2. Цель исследования и постановка задач

Целью работы является разработка теоретических основ обеспечения устойчивости стеганографических алгоритмов к возмущающим воздействиям – атакам против встроенного сообщения в пространственной области изображения-контейнера.

Для достижения цели необходимо решить *задачи*:

1. Получить соответствия между формальными представлениями устойчивых стеганопреобразований в области преобразования изображения и пространственной области;
2. Разработать формальное достаточное условие обеспечения устойчивости стеганоалгоритма к возмущающим воздействиям при организации стеганопреобразования в пространственной области контейнера-изображения;
3. Получить рекомендации по выбору размера блока контейнера, задействованного в стеганопреобразовании, как одного из определяющих вычислительную погрешность параметров в формируемом стеганосообщении.

Достижение поставленной цели позволит разработать на основе полученного формального достаточного условия обладающие приемлемой вычислительной сложностью стеганометоды и реализующие их алгоритмы, устойчивые к возмущающим воздействиям, работающие в пространственной области контейнера.

3. Основная часть

Достаточные условия обеспечения устойчивости к возмущающим воздействиям стеганометодов и алгоритмов уже обсуждались в открытой печати [2-4]. Однако эти условия реализовывались в областях преобразования матрицы контейнера. Так в [3] было доказано, что для обеспечения устойчивости к сжатию СП достаточно проводить таким образом, чтобы его формальным представлением была совокупность S возмущений максимальных сингулярных чисел (СНЧ) блоков матрицы контейнера. Полученное достаточное условие обеспечивает устойчивость и к другим атакам против встроенного сообщения, а с учетом той математической базы, которая была положена в его основу, – общий подход к анализу состояния и технологии функционирования информационных систем [2,3], упомянутое достаточное условие рассматривается для возмущающих воздействий, независимо от их конкретики. Практической реализацией этого достаточного условия явились устойчивые к атакам против встроенного сообщения стеганометод и реализующий его алгоритм $A1$, разработанный в [3], где погружение ДИ, представляющей из себя случайно сформированную бинарную последовательность, проводилось путем возмущения максимальных СНЧ блоков матрицы ЦИ-контейнера, полученных в результате ее стандартного разбиения.

В силу однозначности нормального сингулярного разложения [3], дискретного преобразования Фурье, однозначного определения матрицы ЦИ в пространственной области своими элементами существует взаимнооднозначное соответствие между изменениями параметров, определяющих ЦИ, в разных областях преобразования, а также соответствие между изменениями параметров в области преобразования и параметров в пространственой области изображения. Основываясь на этом, найдем соответствие между возмущением максимального СНЧ блока матрицы контейнера, гарантирующего при СП его устойчивость к атакам против встроенного сообщения, и возмущениями яркости пикселей блока.

Пусть B - $l \times l -$блок марицы изображения-контейнера. Для B существует сингулярное разложение [2,3]:

$$B = U\Sigma V^T = (u_1,...,u_l)\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_l \end{pmatrix}(v_1,...,v_l)^T, \quad (1)$$

где U, V - ортогональные $l \times l -$ матрицы, столбцы которых u_i, v_i, $i = \overline{1,l}$, - левые и правые сингулярные векторы (СНВ) B соответственно, $\Sigma = diag(\sigma_1,...,\sigma_l)$, $\sigma_1 \geq ... \geq \sigma_l \geq 0$ - СНЧ.

Пусть процесс СП для блока формально выражается в возмущении его сингулярных чисел. Тогда его результатом будет блок $\overline{B}$ СС, отвечающий с учетом (1) матричному выражению:

$$\overline{B} = U(\Sigma + \Delta\Sigma)V^T, \quad (2)$$

где $\Delta\Sigma = diag(\Delta\sigma_1,...,\Delta\sigma_l)$ - диагональная матрица возмущений $\Delta\sigma_i$ СНЧ σ_i, $i = \overline{1,l}$, матрицы B в результате СП.

Возмущение наибольшего СНЧ блока B с учетом (2) формально выразится следующим образом:

$$\overline{B} = (u_1,...,u_l)\begin{pmatrix} \sigma_1+\Delta\sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_l \end{pmatrix}(v_1,...,v_l)^T = (u_1,...,u_l)\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_l \end{pmatrix}(v_1,...,v_l)^T +$$

$$+(u_1,...,u_l)\begin{pmatrix} \Delta\sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}(v_1,...,v_l)^T, \qquad (3)$$

то есть

$$\overline{B} = B + \Delta\sigma_1 u_1 v_1^T .$$

Таким образом, отображением формулы (3) в пространственной области будет соотношение:

$$\overline{B} = B + \Delta B . \qquad (4)$$

где $\Delta B = \Delta\sigma_1 u_1 v_1^T$ - матрица возмущения блока B.

Соотношение (4) дает общее формальное представление процесса СП в пространственной области контейнера [2].

В [11] показано, что СНВ u_1, v_1 блоков матрицы ЦИ, отвечающие максимальным СНЧ, в случае нормального сингулярного разложения [2], которое дополнительно требует лексикографическую положительность левых СНВ, в подавляющем большинстве блоков изображения близки к *n*-оптимальному вектору n^O пространства R^l:

$$u_1 \approx n^O,\ v_1 \approx n^O, \qquad (5)$$

при этом *n*-оптимальный вектор имеет вид:

$$n^O = \left(\frac{1}{\sqrt{l}}, \frac{1}{\sqrt{l}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{l}}\right)^T \in R^l . \qquad (6)$$

Рассмотрим подробно матрицу ΔB, фигурирующую в (4), имеющую единичный ранг. Если $u_1 = (u_{11}, u_{21},..., u_{l1})^T$, $v_1 = (v_{11}, v_{21},..., v_{l1})^T$, то эта матрица представляется следующим образом:

$$\Delta B = \Delta\sigma_1 u_1 v_1^T = \Delta\sigma_1 \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ \dots \\ u_{l1} \end{pmatrix} \left(v_{11}, v_{21}, \dots, v_{l1}\right) = \begin{pmatrix} \Delta\sigma_1 u_{11} v_{11} & \Delta\sigma_1 u_{11} v_{21} & \dots & \Delta\sigma_1 u_{11} v_{l1} \\ \Delta\sigma_1 u_{21} v_{11} & \Delta\sigma_1 u_{21} v_{21} & \dots & \Delta\sigma_1 u_{21} v_{l1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\sigma_1 u_{l1} v_{11} & \Delta\sigma_1 u_{l1} v_{21} & \dots & \Delta\sigma_1 u_{l1} v_{l1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

С учетом (5) и (6) формула (7) может быть записана в виде:

$$\Delta B = \begin{pmatrix} \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \dots & \frac{\Delta\sigma_1}{l} \\ \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \dots & \frac{\Delta\sigma_1}{l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \frac{\Delta\sigma_1}{l} & \dots & \frac{\Delta\sigma_1}{l} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таким образом, устойчивое СП, которое первоначально было разработано в области сингулярного разложения матрицы [3], может быть реализовано в пространственной области ЦИ-контейнера путем коррекции яркости всех пикселей очередного блока, задействованного в процессе погружения ДИ, на одно и то же значение, равное

$$\Delta b = \frac{\Delta\sigma_1}{l}. \quad (9)$$

Замечание 1. Говоря о проблемах информационной безопасности в целом, необходимо отметить, что соответствие процессов (3)-(4) может рассматриваться и в обратном порядке: коррекция яркости пикселей, проводимая в пространственной области в качестве обработки ЦИ, может быть реализована путем коррекции максимального сингулярного числа соответствующей матрицы. Полученный математический результат может быть использован для решения других, не менее важных задач информационной безопасности: выявления результатов (несанкционированного) изменения изображения, локализации областей нарушения его целостности [12]. Решение упомянутых задач обеспечивается пассивными методами защиты информации и является очень важным в современных условиях повсеместного распространения различных программных комплексов, графических редакторов (Adobe Photoshop, GIMP и др.), используемых для фальсификаций цифровых контентов.

Основной вопрос при разработке конкретных стеганографических методов и алгоритмов, основанных на организации СП в соответствии с (4), (8), будет заключаться в определении/выборе значений $\Delta\sigma_1, l$, обеспечивающих устойчивость алгоритмов к различным возмущающим воздействиям с учетом соблюдения надежности восприятия формируемого СС. Величина блока l при организации СП важна также с учетом возможности возникновения/накопления вычислительной погрешности при формировании СС, которая, в свою очередь, может оказать негативное влияние на эффективность декодирования ДИ в разрабатываемых алгоритмах.

Замечание 2. С учетом особенностей машинной арифметики, а также соотношений (5) в большинстве блоков матрицы изображения после операции (3) точное равенство в (8) достигаться не будет, хотя отклонение будет незначительным.

Для практической оценки величины отклонения в среде Matlab был проведен вычислительный эксперимент, в котором было задействовано 200 ЦИ разных форматов (с потерями, без потерь), в градациях серого, цветные (цветовая схема RGB; в этом случае анализу подвергалась синяя составляющая изображения). В ходе эксперимента матрица ЦИ разбивалась на $l \times l -$блоки B ($l \in \{4,8,16\}$), для каждого из которых строилось разложение (1), после чего σ_1 возмущалось на $\Delta\sigma_1$ ($\Delta\sigma_1 \in \{60,80,100\}$) (одинаковое для всех блоков); после возмущения СНЧ блок $\overline{B}$ восстанавливался в соответствии с (3). Когда описанная операция была проведена со всеми блоками ЦИ, оно переводилось в формат *uint8*, обеспечивающий введение значений яркости пикселей во множество $\{0,1,2,...,255\}$, после чего в пространственной области ЦИ определялось значение среднего возмущения яркости пикселей по всему ЦИ, которое сравнивалось с ожидаемым (9). Иллюстрацией типичных результатов эксперимента является гистограмма полученных средних значений для случая $l = 8$, $\Delta\sigma_1 = 80$, приведенная на рис.1. Среднее значение Δb по всем ЦИ здесь составило 9.65 (при ожидаемом 10), что отвечает относительной погрешности 3.5%. При этом средние значения Δb для большинства изображений, принимавших участие в эксперименте, оказались близкими к 10 (см.рис.1).

Замечание 3. При фиксированном $\Delta\sigma_1$ относительная погрешность получаемого по формуле (9) Δb будет увеличиваться с уменьшением l.

Действительно, чем меньше l, тем больше значение Δb коррекции яркости пикселей, тем больше вероятность того, что результат такой коррекции (как в случае осветления, так и в случае затемнения) приведет к выходу новых значений за пределы множества $\{0,1,...,255\}$, т.е. к дополнительному росту вычислительной погрешности (и, как следствие, к росту вероятности возникновения ошибок при декодировании ДИ в стеганоалгоритме, основанном на (4), (8)).

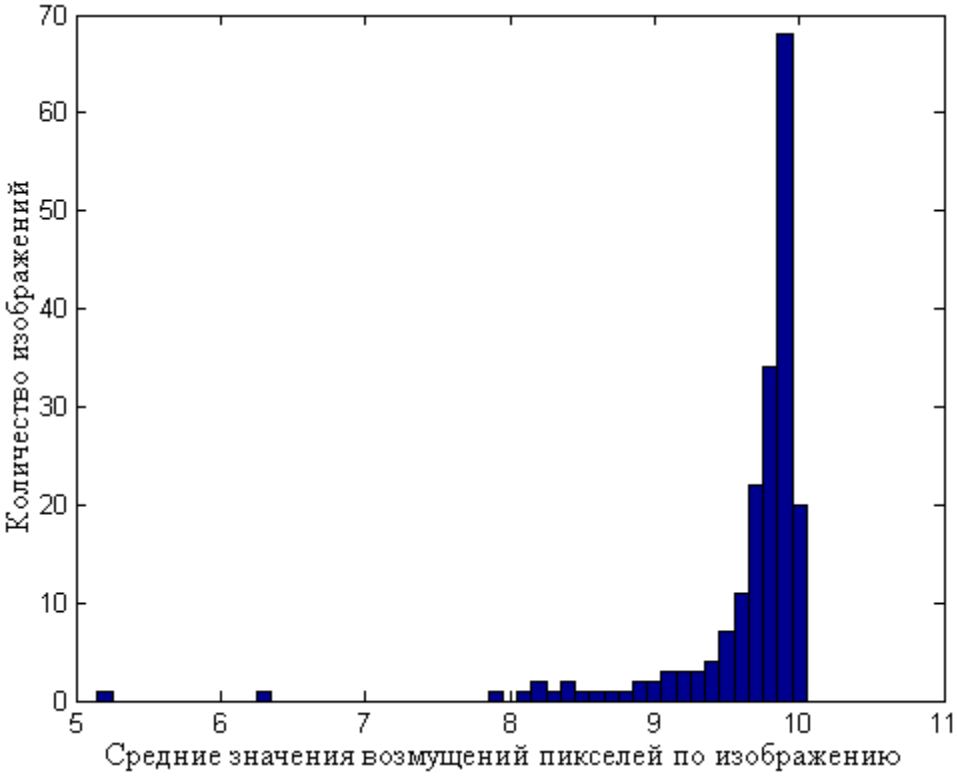


Рис.1. Гистограмма средних по изображению значений возмущений яркости пикселей ($l = 8$, $\Delta\sigma_1 = 80$)

Практическим подтверждением истинности замечания 3 является монотонное убывание относительной погрешности среднего по эксперименту значения Δb с ростом размера блока l, установленное в результате описанного выше эксперимента, иллюстрацией чего является график, приведенный на рис.2 для $\Delta\sigma_1 = 80$. Заметим, что если при переходе от $l = 16$ к $l = 8$ относительная погрешность среднего значения Δb возрастает незначительно, то при переходе от $l = 8$ к $l = 4$ рост существенный, что говорит о преимуществах использования в процессе СП, основанного на (4), (8), блоков размера 8×8 над блоками 4×4. Преимущество 8×8-блоков по сравнению с блоками размера 16×16 вытекает из уменьшения в 4 раза скрытой пропускной способности [4] организуемого стеганографического канала связи в случае использования последних при СП. Таким образом, наиболее приемлемым размером блока матрицы контейнера для организации СП в соответствии с (4), (8) является $l = 8$.

Совокупные результаты проведенного эксперимента говорят о принципиальной возможности практического использования (8) при организации устойчивого к атакам против встроенного сообщения СП, основанного на (4).

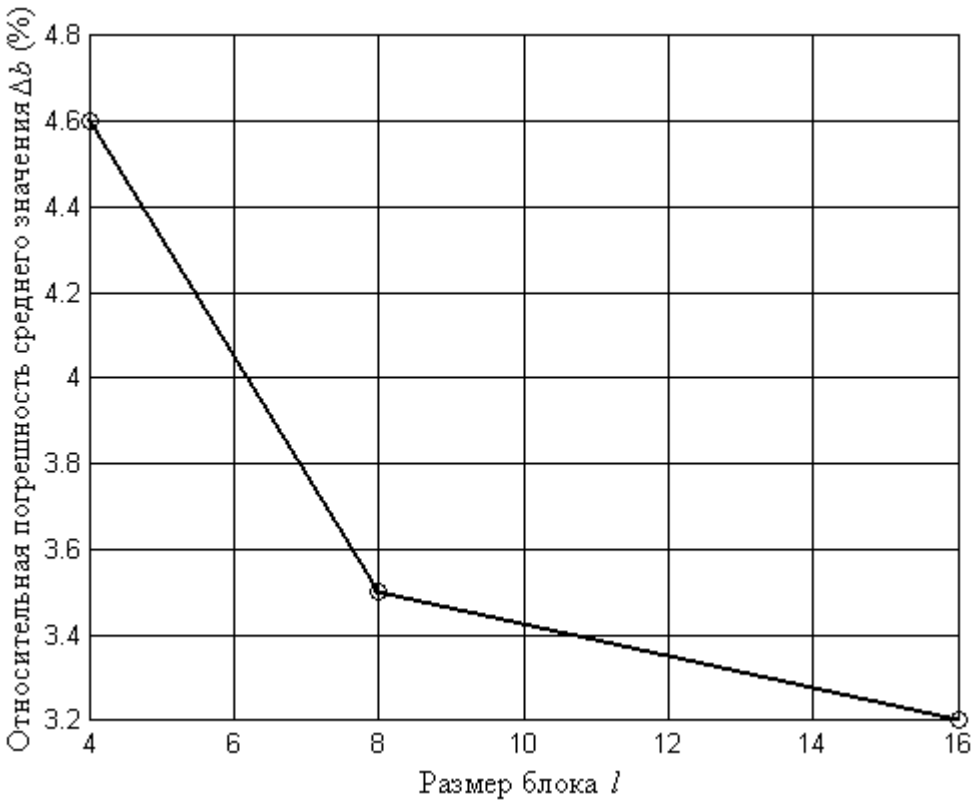


Рис.2.Зависимость относительной погрешности среднего по эксперименту значения Δb от размера блока изображения

В [11] показано, что для возможности декодирования ДИ из СС, претерпевшего возмущающие воздействия, совокупный результат возмущений блоков ОС при погружении ДИ должен превосходить возмущение, которое будет претерпевать блок СС в процессе возмущающего воздействия в канале атаки.

Пусть предполагаемое возмущение блока $\overline{B}$ СС при атаке – это $\Delta\overline{B}$, тогда в соответствии с соотношением [3]:

$$\max_{1\le j\le l}\left|\sigma_j(\overline{B})-\sigma_j(\overline{B}+\Delta\overline{B})\right|\le\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2,$$

где $\sigma_j(\overline{B})$, $\sigma_j(\overline{B}+\Delta\overline{B})$ - СНЧ матриц $\overline{B}$ и $\overline{B}+\Delta\overline{B}$ соответственно, $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$ - спектральная матричная норма $\Delta\overline{B}$, каждое СНЧ блока, в том числе и σ_1, возмутится на величину, меньшую либо равную $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$. Тогда в соответствии с вышесказанным возмущение СНЧ σ_1 блока B при СП, организуемом в области сингулярного разложения, должно быть больше, чем $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$, откуда вытекает, что возмущение Δb значений яркости пикселей блока B ОС при погружении ДИ в пространственной области для обеспечения устойчивости к атаке, количественной оценкой которой является $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$, должно удовлетворять соотношению:

$$\left|\Delta b\right| = \left|\frac{\Delta\sigma_1}{l}\right| > \frac{\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2}{l}. \qquad (10)$$

Таким образом, из всего вышесказанного вытекает истинность следующего утверждения.

Утверждение 1 (*достаточное условие устойчивости стеганоалгоритма к возмущающим воздействиям, реализуемое в пространственной области ЦИ-контейнера*). Для того, чтобы стеганографический алгоритм был устойчивым к атаке против встроенного сообщения, результат которой на блок $\overline{B}$ стеганосообщения оценивается как $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$, достаточно, чтобы организуемое в пространственной области ЦИ-контейнера СП формально представлялось для $l \times l-$блока B ОС, задействованного в СП, в виде возмущения яркости пикселей на величину Δb, для которой имеет место соотношение (10).

Обеспечение устойчивости стеганоалгоритма к конкретным возмущающим воздействиям будет определяться конкретным выбором значения Δb, для чего необходима оценка величины $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2$.

В настоящий момент передача информации, в том числе ЦИ, по каналам коммуникаций происходит, как правило, в сжатом виде. Поэтому сама передача ЦИ в форматах без потерь, в большей или меньшей мере, привлекает к себе внимание. Это говорит о том, что СС еще на стадии его формирования для увеличения вероятности нераскрытия стеганографического канала связи имеет смысл сохранять в формате с потерями (например, Jpeg), т.е. для СП сегодня целесообразно *всегда* использовать стеганоалгоритмы, устойчивые к сжатию.

В [3] была получена оценка величины возмущающего воздействия стандартного $8 \times 8-$блока при сжатии ЦИ (формат Jpeg) с коэффициентами качества $QF \geq 60$: $\left\|\Delta\overline{B}\right\|_2 < 72$. Использование этого результата с учетом (10) определяет значение $\Delta b = 9$, которое гарантирует высокую устойчивость стеганоалгоритма, построенного на основе полученного достаточного условия, к сжатию для $QF \geq 60$, разработка которого и является сейчас основной задачей авторов.

4. Выводы

В работе получены следующие результаты:

- на основе матричного анализа и теории возмущений получено формальное достаточное условие обеспечения устойчивости стеганоалгоритма к атакам против встроенного сообщения при организации стеганопреобразования в пространственной области контейнера-изображения;
- получены рекомендации по выбору размера блока контейнера, задействованного в стеганопреобразовании, как одного из параметров, определяющих величину вычислительной погрешности в стеганосообщении. Для уменьшения накопления вычислительной погрешности при формировании стеганосообщения в соответствии с полученным достаточным условием устойчивости стеганоалгоритма, а также с учетом обратно пропорционального соответствия между величинами скрытой

пропускной способности организуемого стеганографичекого канала связи и размером блока l рекомендовано $l = 8$.

Таким образом, в работе разработан теоретический базис для стеганометодов и алгоритмов, устойчивых к атакам против встроенного сообщения, осуществляющих стеганопреобразование в пространственной области контейнера-изображения.

Литература

[1] Хорошко, В.А. Методы и средства защиты информации [Текст] : научное издание / В.А. Хорошко, А.А. Чекатков; Ред. Ю.С. Ковтанюк. — К. : ЮНИОР, 2003. — 505 с.

[2] Кобозева, А.А. Теория возмущений как основа общего подхода к оценке чувствительности стеганосообщений / А.А. Кобозева, Е.В. Нариманова // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — 2012. — Том 2, № 3. — С. 254–267.

[3] Кобозева, А.А. Формальные условия обеспечения устойчивости стеганометода к сжатию и их реализация в новом стеганоалгоритме *[Електронний ресурс]* / А.А. Кобозева, М.А. Мельник // Проблемы региональной энергетики. — Кишинеу, 2013. — № 1(21). — С. 93–102. — Режим доступу: http://ieasm.webart.md/data/m71_2_237.pdf

[4] Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография [Текст] : монография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. — М. : СОЛОН-Пресс, 2002. — 272 с.

[5] Li, B. A Survey on Image Steganography and Steganalysis / B. Li *et al.* // Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. — 2011. — Vol.2, No.2. — PP.142–172.

[6] Podilchuk, C.I. Digital Watermarking: Algorithms and Applications / C.I. Podilchuk, E.J. Delp // IEEE Signal Processing Magazine. — 2001. — Vol.18, Iss. 4. — PP. 33–46.

[7] Nasir, I.A. A Robust Color Image Watermarking Scheme Based on Image Normalization / I.A. Nasir, A.B. Abdurrman // Proceeding of the World Congress on Engineering. — 2013 Vol III, WCE 2013, July 3-5, London, U.K.

[8] Perwej Y. Copyright protection of digital images using robust watermarking based on joint DLT and DWT / Y. Perwej, F. Perwej, A. Perwej // International Journal of Scientific & Engineering Research. — 2012. — Vol. 3, Iss. 6. — PP. 1–9.

[9] Fan, C.-H. A robust watermarking technique resistant Jpeg compression / C.-H. Fan, H.-Y. Huang, W.-H. Hsu // Journal of Information Science and Engineering. — 2011. — Vol. 27, Iss. 1. — PP. 163–180.

[10] Suhail, M.A. Digital watermarking based DCT and JPEG model / M.A. Suhail, M.S. Obaidat // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2003. — Vol. 52, Iss. 5. — PP. 1640–1647.

[11] Кобозева, А.А. Нечувствительность стеганосообщения к сжатию и формальные достаточные условия ее обеспечения / А.А. Кобозева, М.А. Мельник // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – 2012. — Вип. 38. — С. 193–203.

[12] Кобозева, А.А. Основы метода выявления клонированных участков изображения, подвергнутых коррекции яркости / А.А.Кобозева, Е.Ю.Лебедева // Сучасна спеціальна техніка. – 2013. - №3. – С.13-20.

Сведения об авторах.

Кобозева Алла Анатольевна – д.т.н., проф., зав. каф. информатики и управления защитой информационных систем Одесского национального политехнического университета. Область научных интересов: математические методы защиты информации, численные методы, матричный анализ, дискретная математика. E-mail: alla_kobozeva@ukr.net

Костырка Олеся Викторовна – аспирант Академии пожарной безопасности им.Героев Чернобыля (г.Черкассы). Область научных интересов: методы защиты информации, стеганография.

Лебедева Елена Юрьевна – ст. препод. каф. информатики и управления защитой информационных систем Одесского национального политехнического университета. Область научных интересов: методы защиты информации, методы обработки изображений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рахматулин И.Р.
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования возобновляемых источников энергии для очистки воды. Приведены результаты анализа предпочтительного источника энергии для очистки воды, при использовании установки в местах с дефицитом пресной воды и отсутствием электрической энергии. Рассматривается возможность опреснения соленой воды при помощи энергии солнечных коллекторов для регионов с умеренным климатом. Представлена опреснительная установка, работающая на энергии вакуумных солнечных коллекторов, описан принцип действия разработанной опреснительной установки. Приведены результаты экспериментальных исследований сконструированного опреснителя при работе с вакуумными стеклянными трубками и с вакуумными трубками с медным стержнем внутри. Сделаны выводы о возможности использования солнечных коллекторов для опреснения воды, приведены рекомендации для повышения производительности солнечной опреснительной установки.
Ключевые слова: Солнечный коллектор, опреснительная установка, дефицит пресной воды.

CERCETĂRI EXPERIMENTALE A INFLUENŢEI DIFERITOR CONSTRUCŢII AI COLECTOARELOR SOLARE LA EFICACITATEA INSTALAŢIEI SOLARE PENTRU DEZALINIZAREA APEI

Rahmatulin I.R.
South Ural State University, Chelyabinsk, Federaţia Rusă

Rezumat. În articolul este studiată posibilitatea de utilizare a surselor regenerabile de energie pentru dezalinizarea apei. Sunt prezentate rezultatele analizei sursei preferate de energie pentru dezalinizarea apei, în cazul de utilizare a instalaţiei în regiune cu deficitul apei potabilă şi cu lipsa de energie electrică. Este studiată posibilitatea dezalinizării apei prin utilizarea colectoarelor solare pentru regiune cu climă temperată. Instalaţie de desalinizare a apei, descrisă în articol, funcţionează pe baza colectoarelor solare cu vid. Sunt prezentate rezultatele de cercetări experimentale ale instalaţiei de dezalinizare a apei, care funcţionează cu tuburi din sticlă vidate şi cu tuburi vidate cu tijă din cupru, ampalsat în interiorul tubului. Sunt prezentate concluzii privind utilizare a colectoarelor solare pentru dezalinizare a apei şi recomandările pentru creşterea productivităţii instalaţiei solare pentru purificarea apei.
Cuvinte-cheie: Colector solar, instalaţia de dezalinizare, deficitul apei proaspătă.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF VARIOUS TYPES OF SOLAR COLLECTORS FOR PERFORMANCE SOLAR DESALINATION PLANT

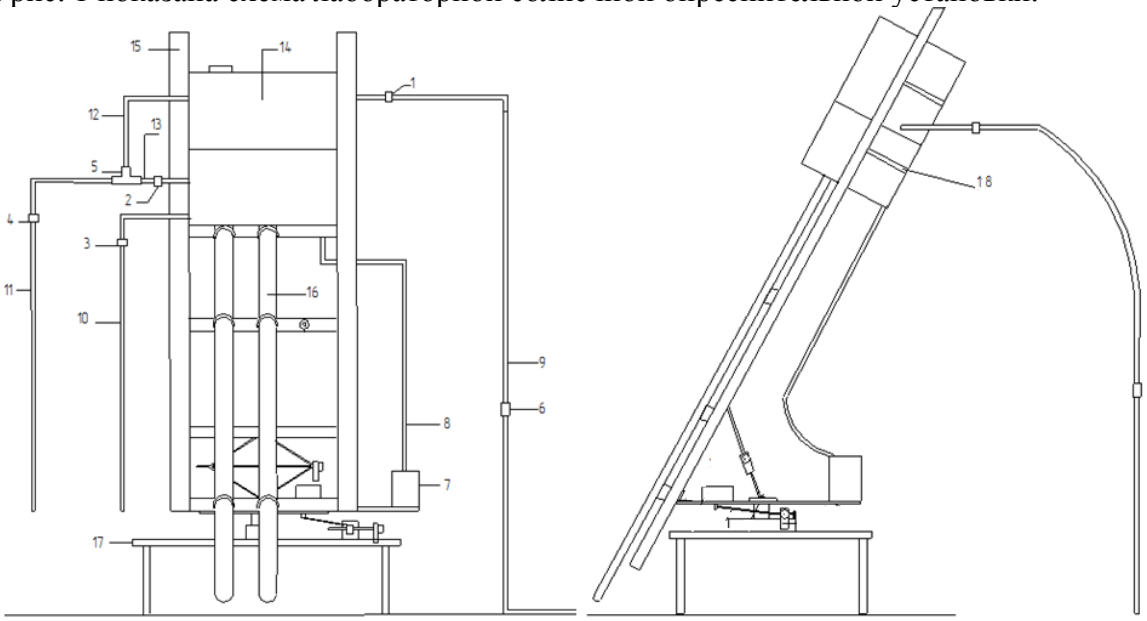
Rakhmatulin I.R.
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the possibility of using renewable energy for water purification. Results of analysis of a preferred energy source for a water purification using installed in places where fresh water shortages and a lack of electrical energy. The possibility of desalination of salt water using solar energy for regions with temperate climate. Presented desalination plant working on energy vacuum solar collectors, principles of action developed by the desalination plant. The experimental results of a constructed distiller when working with vacuum glass tubes and vacuum tubes with copper core inside. Conclusions about the possibility of using solar collectors for water desalination, are tips and tricks to improve the performance of solar desalination plant.
Keywords: Solar collector, a desalination plant, shortage of fresh water.

Энергии вырабатываемыми современными вакуумными солнечными коллекторами достаточно не только для нагрева воды, но и для последующего её испарения. В связи с чем, за счет опреснения соленых вод океанов и загрязненных источников, сделаны выводы о возможности использования потенциала солнечных коллекторов для решения одной из самых глобальных проблем человечества – проблемы дефицита пресной воды. Преимущество использования возобновляемых источников энергии для очистки воды представлены в работах [1], [2]. Опресненную воду можно использовать для сельскохозяйственных нужд, в которых на орошение земель расходуется 50 – 60 % объема необходимого всему народному хозяйству, что составляет примерно 2 100 000 м^3 в сутки [3].

Для подтверждения возможности использования трубок вакуумного коллектора для испарения воды в регионах с умеренным климатом, с учетом предварительных расчетов и испытаний [4], было принято решение о создание лабораторной солнечной опреснительной установки и дальнейшие проведение экспериментальных исследований над ней.

На рис. 1 показана схема лабораторной солнечной опреснительной установки.



а б

Рис.1. Общий вид – а и вид сбоку – б солнечной опреснительной установки: 1,2,3,4 – электромагнитные клапаны, 5 – распределитель, 6 – соединительная муфта, 7 – емкость для дистиллята, 8 – трубопровод для подачи дистиллята, 9 – трубопровод для подачи соленой воды, 10 – трубопровод для сброса соленой воды с повышенным солесодержанием, 11 – трубопровод для сброса соленой воды с повышенной температурой, 12 – трубопровод для выхода соленой воды из емкости для конденсации, 13 – трубопровод для подачи соленой воды в секцию для опреснения, 14 – опреснитель, 15 – алюминиевые профили, 16 – вакуумные трубки солнечного коллектора, 17 – основание установки, 18 – алюминиевые крепления опреснителя на профилях

Соленая вода при открытом клапане – 1 через трубопровод – 9 подается в опреснитель – 14 под давлением из внешнего трубопровода, соединенного с трубопроводом – 9 посредством переходной муфты – 6. Опреснитель – 14 находится в наклонном состоянии, и удерживается при помощи алюминиевых креплений – 18 и профилей – 15 в неподвижном состоянии.

Для наглядности процесса опреснения на рис. 2 приведен вид опреснителя в разрезе.

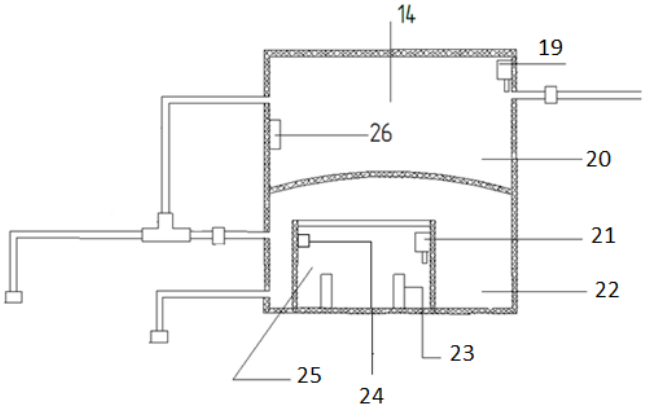


Рис. 2. Вид опреснителя в разрезе: 19 – датчик наличия воды в секции для конденсации, 20 – секция для конденсации, 21 – датчик наличия воды в секции для опреснения, 22 – секция для дистиллята, 23 – термотрубки вакуумного солнечного коллектора, 24 – датчик солености в емкости для опреснения, 25 – секция для опреснения, 26 – температурный датчик

Далее соленая вода попадает в секцию для конденсации – 20. Уровень поступающей соленой воды контролирует датчик наличия воды – 19, который при понижении необходимого уровня воды открывает клапан – 1. При подаче сигнала от датчика наличия воды – 21 происходит открытии клапана – 2 и вода по трубопроводу – 13 поступает в секцию для испарения – 25, в которой медные стержни – 23 трубок вакуумного коллектора – 16 нагревают соленую воду. Соленая вода начинает нагреваться и испаряться. Образовавшийся пар поднимается и вследствие теплообмена между поверхностью секции для конденсации и паром, начинает конденсироваться. По наклонным поверхностям секции для дистиллята, образовавшиеся капли опускаются на дно емкости, где через трубопровод – 8 поступают в емкость для дистиллята.

Для того чтобы пар успевал сконденсироваться и не создавал повышенное давление в секции для опреснения, необходимо чтобы температура воды в секции для конденсации, не превышала температуру пара. Для этого в секции для конденсации устанавливается дискретный датчик температуры - 26, при превышении допустимого уровня температуры, датчик подает сигнал на открытие клапана – 4, до тех пор, пока температура в секции не стабилизируется.

В секции для испарения с течением времени увеличивается концентрация соли в испаряемой воде, что приводит к образованию накипи на нагревательных элементах, вследствие чего ухудшается теплопередача и снижается эффективность установки. Для снижения концентрации соли клапаном – 3 производится сброс рассола с повышенным содержанием соли. Для избегания потерь в производительности установки, данное действие осуществляется в ночное время.

На рисунке – 3 показана фотография опреснительной установки.

Рис. 3. Фотография солнечной опреснительной установки

Запуск процесса опреснения осуществляется через пульт управления, в котором установлено электрическое оборудование установки.

Для проведения экспериментов были использованы вакуумные стеклянные полые трубки и вакуумные трубки с медным стержнем внутри.

Условия проведения экспериментов:

– температура соленой воды на входе в опреснительную установку – 24 ^{0}C;

– установка расположена в южном направлении, под углом - 40^0 к горизонту;

– объем соленой воды в секции для опреснения на начальный момент испытания составляет 1,5 л;

– объем соленой воды в секции для конденсации на начальный момент испытания составляет 7 л;

– датчик соленой воды в секции для конденсации установлен на уровне 1,2 л. Датчик соленой воды в секции для конденсации установлен на уровне 5 л.

Производительность установки во многом зависит от технических характеристик вакуумных коллекторов, так как чем меньше потерь при передаче солнечной энергии в тепловую, тем больше производительность солнечного опреснителя.

Технические характеристики трубок вакуумного солнечного коллектора:

– коэффициент пропускания боросиликатного стекла: ≥ 0,92;

– поглощаемая способность селективного абсорбирующего покрытия: ≥0,94;

– излучательная способность полусферы: ε ≥ 0,08;

– качество вакуума: < 5x10-5 Па.

Экспериментальные исследования солнечной опреснительной установки проводились в период времени с 1.08.2013 по 31.08.2013 с 9.00 по 19.00 в координатах 54^{0}19′00″ с.ш. 59^{0}23′00″ в.д..

Опыт №1. Производительность установки при работе с вакуумными стеклянными полыми трубками, показана на рис. 4.

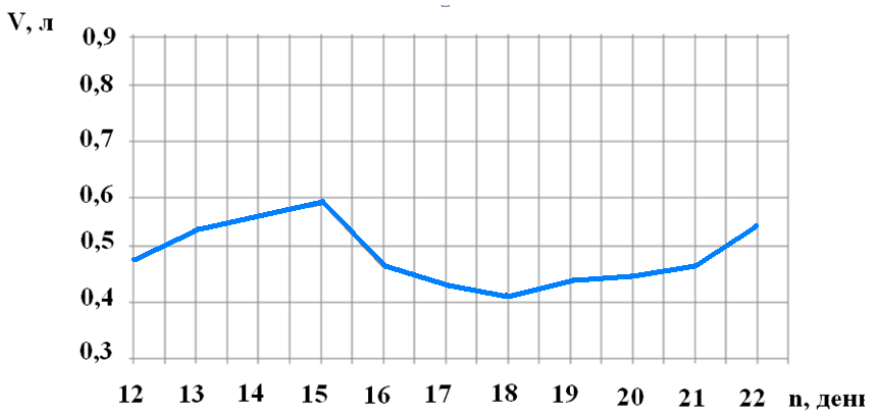


Рис. 4. Производительность солнечной опреснительной установки при работе с вакуумными стеклянными трубками

Производительность солнечной опреснительной установки при работе с вакуумными стеклянными полыми трубками остается на низком уровне и делает экономически не оправданным использование солнечной опреснительной установки для очистки воды. Повышение количества вакуумных трубок не приведет к значительному увеличению производительности. Главным недостатком использования вакуумных стеклянных трубок является не способность довести соленую воду до температуры кипения, состояния в котором наблюдается повышенная интенсивность испарения. Вследствие чего сделан вывод о не желательности использования вакуумных стеклянных трубок в качестве нагревательных элементов в солнечной опреснительной установке.

Производительность солнечной опреснительной установки при работе с вакуумными трубками с медным стержнем внутри, приведена на рис. 5.

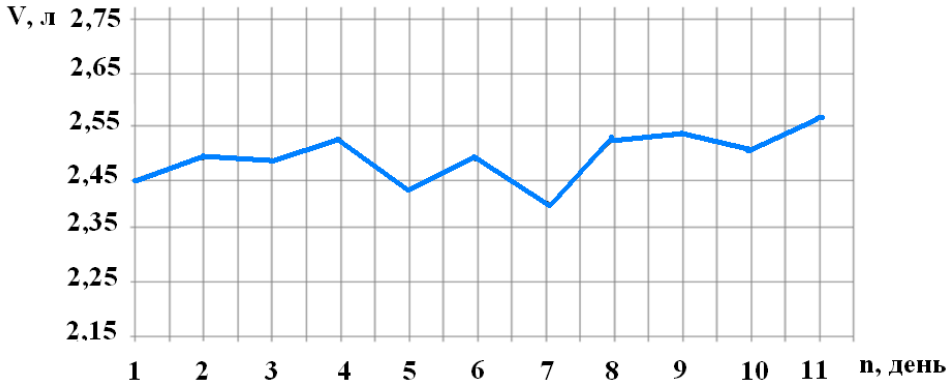


Рис. 5. Производительность солнечной опреснительной установки при работе с вакуумными трубками с медным стержнем внутри

Производительность установки при использовании вакуумных трубок с медным стержнем внутри в несколько раз превышает производительность при использовании вакуумных полых трубок. Это объясняется тем, что медные трубки вакуумного коллектора способны довести воду до температуры кипения, и поддерживать необходимое состояние кипения в течение дня.

Производительность установки во многом зависит от наличия облачности, что отражается на рисунке 5. В зависимости от наличия солнца, производительность установки может колебаться от 0 до 2,6 л. в сутки при использовании двух вакуумных трубок с медным стержнем внутри. В меньшей степени зависит от температуры и

солености опресняемой воды и при производстве небольших объемов воды данные показатели рекомендуется не учитывать.

Выводы

Результаты лабораторных испытаний показывают возможность использования вакуумных трубок солнечного коллектора с медным стержнем внутри для опреснения воды в регионах с умеренным климатом, в местах с дефицитом электрической энергии и в местах экологических катастроф. Производительность можно поднять путем увеличения количества вакуумных трубок, причем, увеличение производительности будет происходить практически в линейной зависимости. Другой способ повышения производительности это использование устройства слежения за солнцем, что сможет увеличить производительность установки на 10 - 30 % в зависимости от региона и времени года.

Литература

[1] Рахматулин И.Р. Экология как основополагающий фактор при проектировании установок по очистке воды / И.Р. Рахматулин // Сборник статей 12 международной научно – практической конференции МНИЦ ПГСХА. – 2012. – С. 107 – 111.

[2] Рахматулин И.Р. Возобновляемые источники энергии в экономике природопользования и охраны окружающей среды / И.Р. Рахматулин // Модернизация научных исследований: материалы 21 Международной научно – практической конференции по философским, филологическим, юридическим, педагогическим, экономическим, психологическим, социологическим и политическим наукам. –2012. – С. 18 – 21.

[3] Слесаренко В.Н. Опреснение морской воды / В.Н. Слесаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 278 с.

[4] Кирпичникова И.М. Экспериментальные исследования лабораторного опреснителя / И.М. Кирпичникова, И.Р. Рахматулин // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №1. – С. 40 – 43.

Сведения об авторе

Рахматулин Ильдар Рафикович, аспирант кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, область научных интересов – солнечная энергетика, опреснение воды. Контактный адрес: Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, e-mail: ildar.o2010@yandex.ru

МОНИТОРИНГ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КИШИНЕВА

Черней М.И., Леу В.И.
Акционерное Общество «Термоком», г. Кишинев

Аннотация. В работе описаны основные модули системы контроля и дистанционного сбора данных централизованной системы теплоснабжения Кишинева, компоненты на уровне производства, транспорта и распределения тепловой энергии.
Ключевые слова: Централизованная система теплоснабжения, автоматизированная система мониторинга, телеметрические системы.

MONITORIZAREA SISTEMULUI DE ALIMENTARE CENTRALIZATĂ CU ENERGIE TERMICĂ CHIŞINĂU

Cernei M., Leu V.
Societatea pe Acțiuni „Termocom”

Rezumat. În lucrare este prezezentată descrierea modulelor principale ale sistemului automatizat de monitoring a sistemului de alimentare centralizată cu energie termică din mun.Chişinău, coponentele la nivel de producere, transport şi distribuție a energiei termice.
Cuvinte-cheie: Sistemul centralizat de alimentare cu căldură, sistemul automatizat de monitoring, sistemele de telemetrie.

MONITORING OF DISTRICT HEATING SYSTEM OF KISHINAU

Chernei M., Leu V.
Joint Stock Company „Termocom”, Kishinau

Abstract. The article describes basic modules of SCADA in district heating system of mun. Kishinau and some main components of it.
Keywords: District heating system, automated monitoring, telemetry systems.

В настоящее время централизованная система теплоснабжения (ЦСТ) имеет следующее основное оборудование:

- ✓ 2 теплоэлектроцентрали, 3 районных котельных с установленной мощностью 300-400 Гкал/ч (ЮРК, ЗРК);
- ✓ 19 пригородных котельных с установленной мощностью до 50 Гкал/ч;
- ✓ 17 насосных станций;
- ✓ тепловые сети (в 2-х трубном исчислении):
  - магистральные и распределительные – 259,9 км;
  - внутриквартальные – 262,1 км;
  - горячего водоснабжения – 188,6 км;
  - 401 центральных тепловых пунктов (ЦТП);
  - 185 блочных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП).

В работе [1] представлен опыт использования предварительно изолированных трубопроводов в пенополиуретановой изоляции (ППУ) в системе теплоснабжения мун. Кишинев, а в [2] опыт применения схем частотного регулирования. В данной работе представлен опыт внедрения автоматизированной системы мониторинга (АСМ).

АСМ обеспечивает учёт, запись и архивацию значений основных параметров работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), тепловых станций (ТС), насосных станций (НС), центральных тепловых пунктов (ЦТП) и индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) (учет отпущенного тепла теплоносителем, расходы теплоносителей, температура теплоносителя и температура горячей воды, давления), в виде графиков или таблиц.

Начиная с 2005 г. телеметрическая система Expert постоянно модернизировалась. Система была предназначена для получения данных с городских источников тепловой

энергии и насосных станций. Впоследствии, была внедрена другая телеметрическая система LOVATI, открытого типа SCADA, которая позволяет обеспечить отражение постоянного обновления как измерительных приборов и инструментов мониторинга (сенсоров), так и алгоритмов обработки и визуализации данных (отчётов, сигналов об авариях, превышения нормированных режимов и т.п.).

Ниже в таблице 1 представлены составные части данной системы, которые распределены технологически и территориально:

Таблица 1. Составные части АСМ

Название составной части	Зона действия
Автоматизированная система мониторинга технологического процесса распределения тепловой энергии LOVATI	2 ТЭЦ, 2 ТС, 17 НС 26 промежуточных пунктов на тепловых сетях.
Автоматизированная система мониторинга технологического процесса выработки тепловой энергии Диспетчер - 60	19 ТС
Автоматизированная система мониторинга технологического процесса распределения тепловой энергии Монитор - ЦТП Автоматизированная система мониторинга БИТП	401 ЦТП 185 ИТП

Преимущества АСМ:

- визуализация в реальном времени базовых параметров (расход, температура, давление) теплоносителя и тепловой энергии выработанной тепловыми централями и доставленной конечному потребителю (рис.1)**;**
- своевременное выявление аварийных ситуаций, регистрацию увеличения утечек теплоносителя, отклонения от нормы отслеживаемых параметров**;**
- составление серии ежедневных и ежемесячных отчётов по потреблению тепловой энергии, локализация трасс и районов с повышенной утечкой тепла (рис. 2.);
- исправление гидравлических и тепловых режимов в соответствии с реальными данными**;**
- оперативное районирование утечек теплоносителя из магистральных и распределительных сетей; внутриквартальных тепловых сетей;
- регулировка потребления электроэнергии электронасосов по реальному расходу и, как следствие, уменьшение расходов электроэнергии**;**
- регулировка расходов в соответствии с потреблением электроэнергии и, как следствие, оптимизация параметров теплоносителя**;**
- оптимизация потребления тепловой энергии, регистрация изменений схем тепловых сетей, планов ремонта и т.п.
- организация коммерческого учёта потребления тепловой энергии и горячей воды**.**

АСМ обеспечивает оперативный просмотр собранных контроллерами данных. Информация может быть представлена в виде карты с нанесенными на нее объектами, в виде таблиц или отражающих положение дел на определенных магистралях. Также по каждому объекту можно получить на экране технологическую схему выбранного объекта с указанием мест отбора параметров и другой сопутствующей информации. Система позволяет контролировать неограниченное количество объектов, поддерживает непрерывный опрос счетчиков тепловой энергии и датчиков температуры (7 шт.), давления (8 шт.), частотных или импульсных (4 шт.). Собранные контроллерами данные передаются на центральный сервер и записываются в базу

данных. Просмотр оперативной информации и отчетов возможен с автоматизированных рабочих мест, объединенных локальной вычислительной сетью предприятия. Ниже приведено описание некоторых рабочих модулей АСМ.

Графическое отображение информации представлено в форме графиков с возможностью самостоятельного выбора периода просмотра, а также автоматического обновления информации. Максимальный период просмотра в графике 7 дней.

В случае аварийных ситуаций возникает необходимость более частого опроса объекта (АСМ позволяет опрашивать объект намного чаще), при этом связь с другими объектами не прекращается, однако цикл опроса возрастает в 3 раза. Через 15 минут приоритетный опрос объекта автоматически прекращается и восстанавливается штатный режим последовательного опроса.

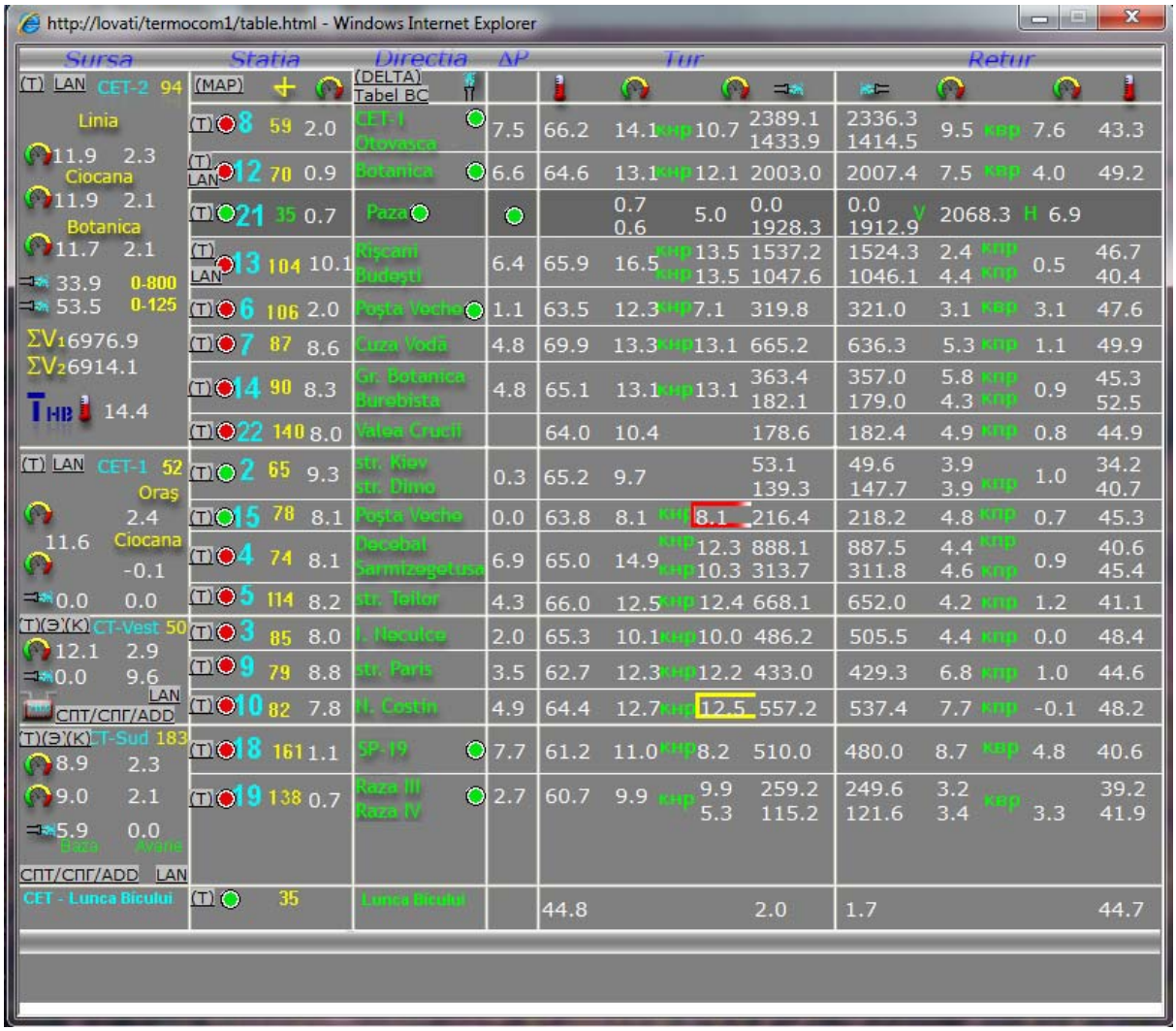


Рис. 1 Визуализация в реальном времени базовых параметров (расход, температура, давление) теплоносителя и тепловой энергии

Также производится автоматический подсчет суммарных значений параметров для всех ЦТП включенных в магистраль (ΣQ, G1, G2, dG, V1, V2, dV, Vгвс). Для значений температуры вычисляется средняя по магистрали, производится автоматический подсчет разницы между источником тепла или насосной станцией (если таковые существуют) к которой подключена магистраль и значениями параметров.

Система позволяет оперативно контролировать состояние радиосвязи и питания от электросети контроллера и теплосчетчика. Параметр «Uнапр» указывает напряжение питания контроллера в Вольтах. Значение параметра от 13В до 14В указывает на наличие напряжения 220В в электросети, значение параметра от 10В до 12В указывает на отсутствие напряжения 220В в электросети и работу контроллера от аккумуляторной батареи. *Примечание:* Падение напряжения на аккумуляторной батарее ниже 10В приводит к останову работы контроллера и теплосчетчика на объекте.

Модуль «Сервер отчеты»» предназначен для просмотра отчетов о работе широкого спектра объектов, таких как: источники тепла, насосные станции и центральные тепловые пункты предприятия. Ниже приведено краткое описание некоторых отчетов:

1. ОТЧЕТ «MULTICAL DAILY» - предназначен для анализа данных полученных с теплосчетчиков о потребленной тепловой энергии и других параметров на объекте в среднем за сутки и по контуру в целом.
2. ОТЧЕТ « DCX CURENT» - предназначен для детального анализа данных полученных с аналоговых и температурных входов контроллера установленного на объекте
3. ОТЧЕТ « MULTICAL CURENT» - предназначен для детального анализа данных полученных с теплосчетчика установленного на объекте.
4. ОТЧЕТ « MULTICAL DAILY» - предназначен для анализа данных полученных с теплосчетчиков о потребленной тепловой энергии и других параметров на объекте в среднем за сутки.
5. ГРАФИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ «MULTICAL GRAPH» - предназначен для детального анализа в графической форме всех значений параметра полученных с теплосчетчика установленного на объекте по времени контроллера.
6. ГРАФИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ « MULTICAL GRAPH2» - предназначен для детального анализа в графической форме значений параметра полученных с теплосчетчика установленного на объекте через каждые 20 минут.

Следует отметить, что возможно сохранения отчета в нужном файловом формате XML, CSV, TIFF, PDF, WEB archive, Excel.

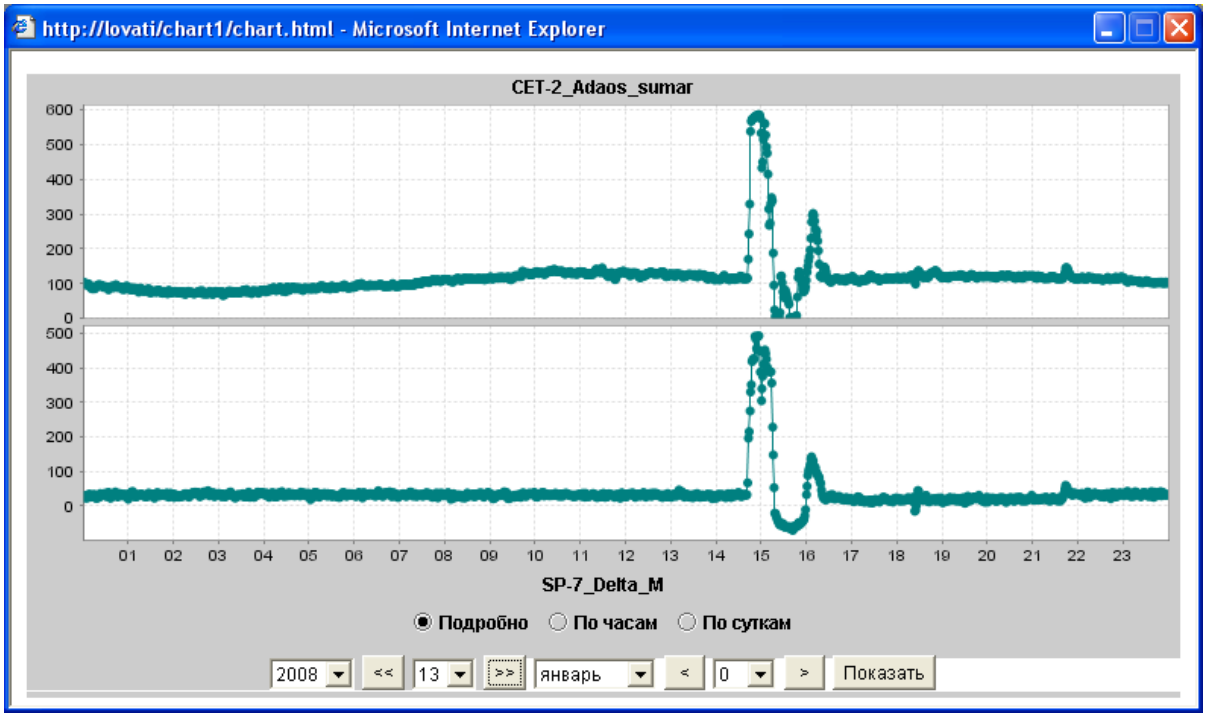


Рис. 2. Изменение подпитки на ТЭЦ №2 и дельта-расходов на напоре ПНС №7

На верхнем рисунке зафиксирован аварийный рост подпитки на ТЭЦ №2, при этом благодаря автоматизированной системе мониторинга было зафиксировано направление разрыва на тепловых сетях, в данном случае выше ПНС №7 и в течении получаса линия была отключена.

Модуль "Лимиты Т1/Т2" предназначен для оперативной оценки ситуации в АСМ и в нем применен следующий алгоритм работы сигнализации (цветная точка). Данный модуль предназначен для установки пределов изменения температуры в подающем и обратном трубопроводе в СЦТ в соответствии с утвержденным температурным графиком теплоснабжения (130/70 °С). Данные пределы автоматически распространяются на все значения температуры Т1 и Т2 в АСМ, что приводит к изменению окраски после завершения сеанса связи с объектом.

Вар. 1 (зима): Автоматическая установка значения Т2 в зависимости от Т1.

Установка температуры подачи производится в соответствии с утвержденным температурным графиком теплоснабжения, автоматический при помощи интерполяции из температурного графика теплоснабжения будет вычислена температура обратной сетевой воды.

Сигнализация

Красный	Т1 ↑, Т2↑, (Т1 ↑, Т2 – норма)	Т1↑, Т2↓,	Т1↓, Т2↑, (Т1 - норма, Т2 ↑)
Зеленый	Т1 , Т2 - норма	(Т1 – норма , Т2↓)	
Синий	Т1↓, Т2↓	Т1↓ , Т2 – норма	

Норма – изменения значения Т1 , Т2 в пределах +- 3% от заданных.

↑ - превышение значения Т1 , Т2 относительно нормы.

↓ - понижение значения Т1 , Т2 относительно нормы.

Вар. 2 (Лето): Ручная установка значений Т1/Т2.

Сигнализация идентична варианту 1

Модуль "Лимиты Тгвс" предназначен для установки пределов изменения температуры горячего водоснабжения в СЦТ в соответствии с утвержденным температурным графиком. Данные пределы автоматически распространяются на все значения температуры Тгвс в АСМ «Монитор».

L;l.Ручная установка пределов Тгвс.

Сигнализация

Красный	Тгвс ↑
Зеленый	Тгвс - норма
Синий	Тгвс↓

Норма – изменения значения Тгвс в пределах +- 5 °С от заданной.

↑ - превышение значения Тгвс относительно нормы.

↓ - понижение значения Тгвс относительно нормы.

Внедрение АСМ, мониторинг и оперативное реагирование на нештатные ситуации с учетом того, что износ тепловых сетей составляет 65,1%, дало достижение уровня подпитки ЦСТ Кишинев в три раза ниже норматива (0,25% среднегодового объема воды в тепловой сети и присоединенных к ней системах теплопотребления в час независимо от схемы их присоединения). Удельная утечка теплоносителя постоянно снижалась, и достигнутые результаты представлены на рис.3. САМ было внедрена начиная с 2005 г. а общая инвестиционная составляющая составляет 1,7 млн. Евро, а полученный экономический эффект за 2005-2012 годах составляет 24 млн. Евро. За основу расчета был взят достигнутый показатель подпитки в 2004г. Экономия

представляла собой сэкономленные средства с учетом среднегодовой стоимости подпиточной воды и тепловой энергии.

Рис.3. Удельная утечка теплоносителя.

В настоящее время разработан и утвержден перечень первоочередных инвестиционных мероприятий на краткосрочный период (три года) [3]. В ближайшем будущем будет завершено внедрение системы автоматического мониторинга тепловых установок на вводах потребителей.

Литература

[1] М. Черней, Леу В. Об использовании предизолированных трубопроводов в ППУ изоляции в системе теплоснабжения мун. Кишинев. // «Новости теплоснабжения» №3 (151), 2013г., с.46-49.

[2] Черней М., Леу В. Опыт применения схем частотного регулирования в централизованной системе теплоснабжения г.Кишинев. // «Новости теплоснабжения» №4 (152), 2013г, с. 35-38.

[3] Identification of Near-term Priority and Preparation of their Technical Specifications and Tender Documents. Final Report 26 February 2013. Sweco International AB. www.termocom.md

Сведения об авторах.

Черней М.И., к.т.н., генеральный директор АО «Термоком». Область интересов: электроэнергетика, теплоэнергетика.
E-mail**:** cernei@termocom.md

Леу В.И., технический директор. Область интересов: тепло-энергетика.
E-mail: leu@termocom.md

DETERMINAREA NIVELULUI DE INFLUENŢĂ A FACTORILOR ALEATORI ASUPRA CALITĂŢII ŞI FIABILITĂŢII ALIMENTĂRII CU ENERGIE ELECTRICĂ

Popescu V.S.
Universitatea Agrară de Stat din Moldova

Rezumat. Procesul de funcţionare a reţelele electrice este însoţit de o serie de probleme, dintre care problema cheie o constituie cea a fiabilităţii acestor reţele. La etapa de faţă în reţelele de transport şi distribuţie a energiei electrice au loc un număr semnificativ de deconectări, condiţionate de diferiţi factori aleatori de influenţă. Problema asigurării continuităţii şi calităţii alimentării consumatorilor cu energie electrică este o problemă destul de actuală pentru electroenergetica republicană şi pentru soluţionarea ei este absolut necesar de cunoscut factorii de influenţă şi impactul lor asupra fiabilităţii echipamentelor instalate în reţelele electrice. Această lucrare este dedicată criteriului de apreciere a impactului factorilor de influenţă asupra fiabilităţii reţelelor electrice şi a mecanismului de prognoză şi asigurare a continuităţii alimentării cu energie electrică a consumatorilor.
Cuvinte-cheie: Calitate de funcţionare, reţele electrice, indicatori de fiabilitate, factori aleatori, caracteristicile refuzurilor din reţelele electrice.

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF RANDOM FACTORS ON THE QUALITY AND RELIABILITY OF POWER SUPPLY

V.S. POPESCU
Agrarian University of Moldova

Abstract. The operation of power networks is accompanied by a number of issues including the key issue is the reliability of these networks. At the present stage in the transmission and distribution of electricity held a significant number of disconnections, subject to various random factors of influence. The problem of ensuring continuity and quality of electricity supply to consumers is a fairly current Republican power generation and its solution is imperative to know the influence factors and their impact on the reliability of the equipment installed in the electrical network. This paper is dedicated to the criteria for assessing the impact of influence factors on the reliability of electrical networks and forecasting mechanism and continuity of power supply to consumers.
Keywords: Quality of operation, electrical networks, indicators of reliability, random factors, characteristics of faults in electric networks.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Попеску В.С.
Государственный Аграрный Университет Молдовы

Аннотация. Работа электрических сетей сопровождается рядом вопросов, в том числе ключевым вопросом является надежность этих сетей. На современном этапе при передаче и распределении электроэнергии происходит значительное количество отключений, при условии различных случайных факторов влияния. Проблема обеспечения непрерывности и качества электроснабжения потребителей является первостепенной государственной задачей и для ее решения необходимо знать факторы, влияющие на надежность оборудования, установленного в электрической сети. Эта статья посвящена критериям для оценки факторов влияющих на надежность электрических сетей и механизма прогнозирования непрерывности электроснабжения потребителей.
Ключевые слова: Функциональная надежность, показатели надежности; вероятные факторы; электрических сетей; характеристики отказов электрических сетей.

Introducere

Asigurarea alimentării consumatorilor cu energie electrică de calitate este problema cheie a electroenergeticii. Pentru energetica republicană, această problema devine din ce în ce mai stringentă, din cauză că sistemul energetic republican are o vârstă de peste 50 de ani şi

elementele sale sunt învechite şi au un grad sporit de uzură. Din cauza acestei situaţii, în prezent, în reţelele electrice au loc un număr mare de refuzuri care afectează siguranţa alimentării cu energie electrică a consumatorilor. Asigurarea nivelului de fiabilitate poate fi realizată numai prin cunoaşterea tuturor fenomenelor ce însoţesc procesul de funcţionare a reţelelor electrice, ceea ce dă posibilitatea de a prognoza factorii de influenţă şi de a planifica lucrările de profilaxie [3-6,9].

În prezent, factorii ce cauzează apariţia refuzurilor şi impactul lor asupra fiabilităţii reţelelor electrice nu sunt studiaţi, iar nivelul de siguranţă privind alimentarea cu energie electrică a consumatorilor poate fi sporit numai prin cunoaştere profundă a fenomenelor şi a factorilor, ce au o influenţă directă asupra procesului de funcţionare a reţelelor electrice [1,2,5,8].

Această lucrare este consacrată elaborării criteriului de estimare şi prognoză a influenţei diferitor factori asupra fiabilităţii reţelelor de alimentare cu energie electrică a consumatorilor, având drept obiective elaborarea şi aplicarea modelelor matematice privind determinarea impactului diferitor factori aleatori asupra nivelului de fiabilitate a echipamentelor instalate în reţelele electrice.

Dezvăluirea problemei

Pentru a determina factorii de influenţă asupra procesului de alimentare cu energie electrică a consumatorilor a fost procesată informaţia statistică cu privire la fluxurile de refuzuri înregistrate în reţelele electrice. Stabilirea factorilor de cauză a întreruperilor s-a efectuat în baza unui concept elaborat pentru analiza şi sistematizarea datelor experimentale privind refuzurile din reţelele electrice, care a dat posibilitatea de a evidenţia factorii de influenţă asupra procesului de furnizare a energiei electrice. În conformitate cu conceptul propus, au fost determinate douăsprezece grupe de factori aleatori care au condiţionat apariţia refuzurilor în funcţionare a reţelelor electrice şi au influenţat procesul de alimentare cu energie electrică a consumatorilor de toate categoriile de fiabilitate.

Întru estimarea impactului factorilor de influenţă s-a elaborat algoritmul de calcul analitic al nivelului de fiabilitate, ce sistematizează consecutivitatea operaţiilor realizate în procesul de evaluare a factorilor de influenţă asupra fiabilităţii. Algoritmul are la bază următoarele etape:

1) Procesarea datelor experimentale privind fluxurile de refuzuri din reţelele electrice;
2) Clasificarea refuzurilor aleatorii în funcţie de factorii de cauză;
3) Elaborarea modelelor matematice pentru determinarea coeficienţilor de pondere a factorilor de influenţă;
4) Determinarea indicatorilor de bază ai fiabilităţii sistemelor de distribuţie;
5) Estimarea ponderilor factorilor de influenţă asupra indicatorilor de fiabilitate;
6) Trasarea măsurilor de diminuare a influenţei factorilor aleatori;
7) Elaborarea mecanismului de asigurare a continuităţii şi calităţii alimentării consumatorilor cu energie electrică.

Reieşind din cele expuse s-a propus de estimat impactul factorilor de influenţă reieşind din următorii parametrii ai deconectărilor condiţionate: frecvenţa de apariţie, durata lor şi numărul consumatorilor de energie afectaţi. Acest fapt poate fi explicat prin aceea că orice întrerupere $\boldsymbol{i}$ cauzată de un factor oarecare $\boldsymbol{n}$ are o anumită durată $\boldsymbol{T_i}$ şi afectează un anumit număr de consumatori $\boldsymbol{NC_i}$. Totodată, cu creşterea numărului de întreruperi pe un interval de timp determinat $\boldsymbol{\tau}$, cauzate de factorii aleatori, are loc o variaţie semnificativă a indicatorilor de fiabilitate. De aceea fiecare factor are o pondere asupra indicatorilor de fiabilitate reieşind din numărul de întreruperi cauzate, de durata lor şi de numărul de consumatori afectaţi.

În baza criteriului propus pentru estimarea impactului factorilor de influenţă a fost introdusă noţiunea de coeficienţi de pondere asupra calităţii de funcţionare a reţelelor electrice,

în conformitate cu care au fost elaborate expresiile matematice pentru determinarea nivelului de influenţă al fiecărui factor în parte asupra indicatorilor calităţii şi continuităţii de funcţionare.

Coeficienţii de pondere, pentru fiecare factor aleator, se determină:

- coeficientul de pondere al factorului f_1 se determină conform [1]:

$$k_{p1} = \frac{\sum_{k=1}^{m} NC_{1k} \cdot T_{1k}}{\sum_{k=1}^{m} NC_{1k} \cdot T_{1k} + \sum_{l=1}^{p} NC_{2l} \cdot T_{2l} + \sum_{r=1}^{s} NC_{3r} \cdot T_{3r} + ... + \sum_{v=1}^{t} NC_{nv} \cdot T_{nv}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

- coeficientul de pondere al factorului f_2 se determină cu expresia:

$$k_{p2} = \frac{\sum_{l=1}^{p} NC_{2l} \cdot T_{2l}}{\sum_{k=1}^{m} NC_{1k} \cdot T_{1k} + \sum_{l=1}^{p} NC_{2l} \cdot T_{2l} + \sum_{r=1}^{s} NC_{3r} \cdot T_{3r} + ... + \sum_{v=1}^{t} NC_{nv} \cdot T_{nv}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

- coeficientul de pondere al factorului f_3 se determină, după formula:

$$k_{p3} = \frac{\sum_{r=1}^{s} NC_{3r} \cdot T_{3r}}{\sum_{k=1}^{m} NC_{1k} \cdot T_{1k} + \sum_{l=1}^{p} NC_{2l} \cdot T_{2l} + \sum_{r=1}^{s} NC_{3r} \cdot T_{3r} + ... + \sum_{v=1}^{t} NC_{nv} \cdot T_{nv}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- coeficientul de pondere al factorului f_n se determină:

$$k_{p_n} = \frac{\sum_{v=1}^{t} NC_{nv} \cdot T_{nv}}{\sum_{k=1}^{m} NC_{1k} \cdot T_{1k} + \sum_{l=1}^{p} NC_{2l} \cdot T_{2l} + \sum_{r=1}^{s} NC_{3r} + ... + \sum_{v=1}^{t} NC_{nv} \cdot T_{nv}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Unde:

NC_{1k} – numărul consumatorilor afectaţi de întreruperile k, cu durata T_{1k}, cauzate de factorul aleator de influenţă f_1;

NC_{2l} – numărul consumatorilor afectaţi de întreruperile l, cu durata T_{2l}, cauzate de factorul aleator de influenţă f_2;

NC_{3r} – numărul consumatorilor afectaţi de întreruperile r, cu durata T_{3r}, cauzate de factorul aleator de influenţă f_3;

NC_{nv} – numărul consumatorilor afectaţi de întreruperile v, cu durata T_{nv}, cauzate de factorul aleator de influenţă f_n.

În baza expresiilor matematice elaborate au fost determinaţi coeficienţii de pondere a factorilor aleatori asupra indicatorilor calităţii de funcţionare pentru reţelele cercetate. În tabelul 1 se prezintă ca exemplu valorile coeficienţilor calculaţi pentru reţele de medie tensiune.

Tabelul 1. Valorile sezoniere ale coeficienţilor de pondere asupra indicatorilor de continuitate

Factorii		Valorile coeficienţii de pondere			
		Iarna	Primăvara	Vara	Toamna
Nr.	Descrierea	K_p, %	K_p, %	K_p, %	K_p, %
1	Condiţii climaterice	37,3	35,7	37,6	41,5
2	Defecte în echipamente	18,3	26,1	31,1	23,7
3	Factori cu caracter nedeterminat	21,2	21,1	17,7	21,3
4	Acte de vandalism	3,8	3,1	2,4	2,9
5	Defecte în reţelele de transport	2,1	2,2	2,5	2,8
6	Defecte la PDC-uri	2,1	1,9	1,7	1,8
7	Acţiunea animalelor şi a păsărilor	2,1	1,9	1,3	1,9
8	Acţiunea mecanismelor	2,3	1,4	1,6	1,3
9	Avarii cauzate de vegetaţie	2,1	1,6	1,5	0,7
10	Defecte din cauza consumatorului	1,6	1,4	1,5	1,7
11	Calitatea energie electrice	7,0	0,6	0,7	0,3
12	Erori de exploatare	0,1	3,0	0,4	0,1

Conform valorilor obţinute ale coeficienţilor de pondere s-a făcut o caracteristică generală a factorilor de influenţă asupra calităţii şi continuităţii alimentării cu energie electrică a consumatorilor, care este prezentată grafic în figura 1. Din această caracteristică se pot evidenţia factorii cu influenţă semnificativă asupra procesului de alimentare cu energie electrică.

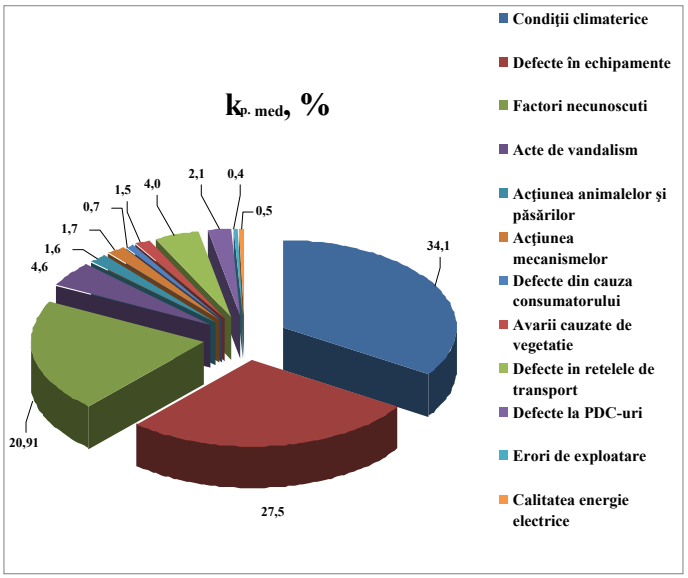


Fig.1. Caracteristica factorilor aleatori de influenţă

Din analiza rezultatelor obţinute reiese că, cei mai semnificativi factori care influenţează indicatorii de continuitate şi calitate a alimentării cu energie electrică a

consumatorilor sunt: condiţiile climaterice, defecte în echipamente şi factorii cu caracter nedeterminat.

În figura 2 este prezentată variaţia ponderilor factorilor de influenţă asupra indicatorilor de fiabilitate pe o perioadă de cinci ani, din care reiese uniformitatea repartiţiei ponderilor factorilor de influenţă.

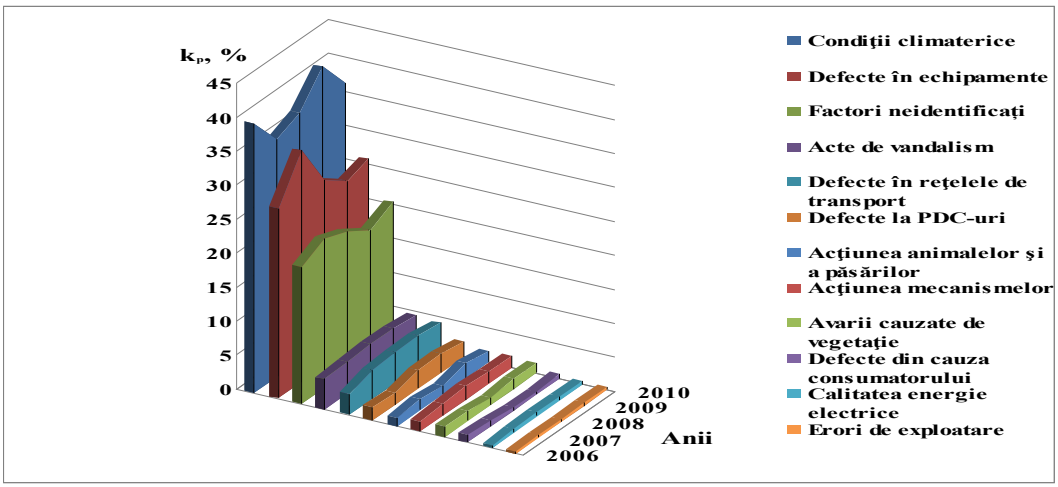


Fig. 2. Evoluţia factorilor aleatori în funcţie de ponderea lor asupra indicatorilor de fiabilitate

Expresiile matematice pentru determinarea coeficienţilor de pondere au permis de a scoate în evidenţă factorii dominanţi cu influenţă pronunţată asupra nivelului de fiabilităţii de funcţionare a reţelelor electrice, care determină calitatea şi continuitatea procesului de furnizare a energiei. Rezultatele obţinute cu privire la estimarea impactului diferitor factori cu caracter aleatoriu permit planificarea măsurilor de asigurare a indicatorilor normaţi de fiabilitate, în conformitate cu cerinţele corespunzătoare.

Concluzii

Criteriul de estimare a nivelului de influenţă a factorilor aleatori asupra fiabilităţii cu utilizarea coeficienţilor de pondere a dat posibilitatea de a aprecia impactul diferitor factori asupra calităţii alimentării cu energie luând în consideraţie numărul de refuzuri cauzate de fiecare factor în particular, de durata refuzurilor şi de numărul consumatorilor afectaţi.

Rezultatele obţinute în baza utilizării expresiilor matematice elaborate pentru determinarea coeficienţilor de pondere au scos în evidenţă faptul că factorii cu influenţă semnificativă asupra calităţii şi continuităţii alimentării cu energie electrică sunt: condiţiile climaterice, defectele în echipamente şi factorii cu caracter nedeterminat.

Bibliografie

[1] Popescu V. Analiza fiabilităţii sistemelor electrice de distribuţie. Problemele energeticii regionale, AŞM, Chişinău, 2012 nr.1 (18) p. 52-57.

[2] Felea I., Dziţac Simona. Fiabilitatea Echipamentelor şi Sistemelor Energetice. Editura Universităţii din Oradea, 2006.

[3] Matica L. About non-sinusoidal situations energetics effects in electrical networks. *Analele universităţii din Oradea*. Universitatea din Oradea, România, 2009, Fascicula de Energetică, Nr. 15, p. 73-76.

[4] Felea I., Secui D., Oltean M. The impact analyze of electric stress level in content of insulating oil gases in power transforrmers. *Journal of sustainable energy*, România, Oradea, 2011, Vol-II,, Nr. 4, p. 7-12.

[5] Popescu V., Gaina A, Bodarev G. Reliability analysis of power distribution systems the voltage of which is 6 and 10 KV. În: *Intelectus,* AGEPI, nr. 1, Chişinău 2012, p. 90-97.

[6] Georgescu O., Sarchiz D., Bucur D. Maintenance Based on Reliability With Applications to Components of Transmission and Distribution Power Lines. Jurnal of Sustainable Energy vol.1 Oradea 2010.

[7] Felea I., Coroiu N., Manea I., Albut D. Electric Switchers Parametrical Reliability Evaluate of an Electric Energi Distribution Zone. Analele Universitatii din Oradea, Fascicula de Energetica vol 13, Oradea 2007.

[8] Erchan F., The Influence of the Asymmetrical Mode of the Reliability on the Quality Electric Energi of the Distributing Networks. Analele Universitatii din Oradea, Fascicula de Energetica vol 15, Oradea 2009.

[9] Erchan F., Vilcov I., The Problem of the Reliability of the Electric Power Equipment. Annales of the University of Craiova nr.13, Craiova 2007.

Despre autor.

Popescu Victor Serghei, doctor în tehnică, conferenţiar universitar al catedrei „ Electrificarea şi automatizarea mediului rural”, Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Interesele ştiinţifice se află în planul asigurării fiabilităţii reţelelor electrice, auditul energetic al consumatorilor din sectorul agrar şi al întreprinderilor de prelucrare primară a producţiei agricole. Autor şi coautor a 67 de lucrări ştiinţifice şi metodico-didactice şi o serie de articole ştiinţifice publicate în reviste recenzate, raporturi la Conferinţe Ştiinţifice Internaţionale. E-mail: vspopescu @mail.ru

МЕТОД РАСЧЁТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В НАКОПИТЕЛЯХ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СО СЛОЕВОЙ НАСАДКОЙ

Ермуратский В.В., Грицай М.А.
Институт энергетики АНМ

Аннотация. В статье рассмотрена задача расчёта нестационарного температурного поля в накопителях явного и скрытого тепла со слоевой насадкой. Предложена методика расчёта этого поля, не прибегая к решению дифференциальных уравнений теплопередачи. Расчёт производится для контрольных объёмов тел последовательно в пространственно-временных координатах. В качестве краевых условий используются результаты, полученные на предыдущем пространственно-временном слое. В каждом контрольном объёме моделируется нагрев одного тела. Предполагается, что остальные тела в контрольном объёме находятся в идентичных условиях. Задача нестационарного теплообмена тела при граничных условиях третьего рода решается приближённо. Для этого используются электротепловые модели и методы электротехники. Выполнение первого закона термодинамики для системы теплоноситель – рабочее тело обеспечивается путём итерационного поиска средней температуры теплоносителя. Предложенная методика позволяет решать задачу расчёта нестационарного температурного поля аккумуляторов тепла при переменных граничных условиях. При этом тела могут быть различной формы – правильной (шар, цилиндр, параллелепипед и т.д.) или неправильной (куски камней, гравий, галька и т.д.). Методика применима для тел с твёрдым и жидким материалом, а также веществом с фазовым превращением. На базе этой методики разработана компьютерная программа расчёта переходных и энергетических характеристик и показателей накопителей.
Ключевые слова: Накопители явного и скрытого тепла, слоевая насадка, электротепловая схема замещения, тепловые сопротивления, материалы с фазовым переходом.

METODOLOGIA DE CALCUL AL CÂMPULUI DE TEMPERATURĂ NESTAȚIONARĂ ÎN ACUMULATOARELE DE ENERGIE TERMICĂ CU RAMBLEU ÎN STRATURI

Ermuratschii V.V., Griţai M.A.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. În lucrare se discută pe scurt problema de calcul al câmpului de temperatură nestaţionară în accumulatoarele de căldură sensibilă şi latentă cu rambleu în straturi. Se propune metodologia de calcul fără utilizarea ecuatiilor diferentiale ale procesului de transfer de căldură. Calculul se efectuează pentru corpurile de volum de control de rambleu în coordonatele spaţiu-timp. Fiecare volum de control este modelat ca un singur corp. Se presupune că restul corpului în volumul de control este în condiţii identice. Problema de transfer de căldură nestaţionar cu condiţiile limită de-al treilea tip este rezolvată aproximativ. În acest scop folosim modele electrotermice şi metode de inginerie electrică. Îndeplinirea primei legi a termodinamicii pentru sistemul „fluid – corp" se asigură prin căutarea prin iteraţie a temperaturii medii a fluidului. Metodologia propusă permite soluţionarea problemei de calcul al câmpului de temperatură nestaţionară în acumulatoarele de căldură cu condiţii la limita variabilă. Totodată, corpurile pot avea forme diferite: regulată (sferă, cilindru, paralelipiped, etc) sau neregulată (pietre, etc). Metodologie poate fi utilizată pentru corpuri solide şi lichide, precum şi pentru materiale cu schimb de fază. Pe baza acestei metodologii este elaborată o programă de calcul al caracteristicilor tranzitorii şi energetice şi indicilor de performanţă ale acumulatoarelor.
Cuvinte–cheie: Acumulatoare de căldură sensibilă şi latentă, rambleu, circuitul termic echivalent, rezistenţe termice, materiale cu schimb de fază.

METHOD OF CALCULATION OF THE NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD INSIDE OF THERMAL PACKED BED ENERGY STORAGE

Ermuratschii V.V., Gritsay M.A.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper presents a method of the approximate calculation of the non-stationary temperature field inside of thermal packed bed energy storages with feasible and latent heat. Applying thermoelectric models and computational methods in electrical engineering, the task of computing non-stationary heat transfer is resolved with respect to third type boundary conditions without applying differential equations of the heat transfer. For sub-volumes of the energy storage the method is executed iteratively in spatiotemporal domain. Single-body heating is modeled for each sub-volume, and modeling conditions are assumed to be identical for remained bodies, located in the same sub-volume. For each iteration step the boundary conditions will be represented by results at the previous step. The fulfillment of the first law of thermodynamics for system "energy storage - body" is obtained by the iterative search of the mean temperature of the energy storage. Under variable boundary conditions the proposed method maybe applied to calculating temperature field inside of energy storages with packed beds consisted of solid material, liquid and phase-change material. The method may also be employed to compute transient, power and performance characteristics of packed bed energy storages.

Keywords: Sensible and latent heat storages, fixed packed bed, equivalent thermal network, thermal resistances, phase change materials.

Условные обозначения

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения
Температура	T	K
Тепловая ёмкость	C	Дж/К
Тепловое сопротивление	R	К/Вт
Тепловой поток	Q	Вт
Тепловая постоянная времени	τ_T	с
Коэффициент теплоотдачи	α	Вт/Км^2
Интервал времени	$\Delta\tau$	с

1. Введение

Известен довольно распространённый вид накопителя тепловой энергии со слоевой насадкой, в котором теплоизолированный канал заполнен рабочими телами, аккумулирующими явное или скрытое тепло [1,2]. В аккумуляторах явного тепла вещество может быть твёрдым или жидким. При применении в качестве аккумулирующего вещества материалов с фазовым переходом первого рода происходит накопление или отдача скрытого тепла при температуре изменения фазового состояния [3]. Эффективность этого способа аккумулирования тепла обусловлена тем, что для этих веществ значение энтальпии фазового перехода значительно выше теплосодержания за счет теплоемкости. Тела могут иметь правильную форму в виде шаров, цилиндров, параллелепипедов и т.д., а также неправильную форму в виде кусков камней, гальки, металлической стружки и т.д. Тела правильной формы могут быть заполнены жидким веществом, аккумулирующим явное тепло, например водой. В этом случае используются тонкостенные сосуды, например, в виде ёмкостей из полимерных материалов (Рис.1). При аккумулировании скрытого тепла тела обычно представляют собой капсулы шарообразной или цилиндрической формы, заполненные материалом с фазовым переходом [3]. Накопитель может иметь несколько каналов, которые работают по очереди, в соответствии с режимами генерации тепла источником и графиком нагрузки потребителя [4,5]. Таким образом, слоевая насадка имеет пористую проницаемую для теплоносителя нерегулярную структуру в случае хаотической (насыпной) насадки и регулярную структуру из тел правильной формы. Достоинством таких аккумуляторов является возможность использования воздуха в качестве теплоносителя, простота конструкции, низкая удельная стоимость, надёжность в работе и сравнительно небольшие затраты

электроэнергии на прокачку теплоносителя. По этим причинам они стали одним из распространённых видов аккумуляторов солнечных систем теплоснабжения [6].

Рис 1. Аккумулятор явного тепла с непосредственным поглощением солнечного излучения (3000 рабочих тел в виде 1,5л. пластиковых бутылок с водой).

При зарядке накопителя через слоевую насадку пропускается теплоноситель с более высокой температурой, чем материал насадки. В процессе теплообмена в насадке формируется температурное поле. Зная распределение температур по объёму аккумулятора можно определить его энергетические характеристики.

Решение задачи расчёта нестационарных температурных полей и энергетических характеристик аккумуляторов тепла необходимо также для оптимизации конструкции всей системы. Наиболее распространённые модели для расчёта нестационарных температурных полей изложены в работах [1,7]. Эти модели, которые разрабатываются с 1929г. [8], предназначены для решения задачи нестационарной теплопроводности пористой среды при граничных условиях третьего рода [9]. Аналитически или численно решаются системы уравнений в частных производных, записанных для пористой среды. Первоначально решения указанной задачи были получены для тел, имеющих малые диаметры или большие удельные коэффициенты теплопроводности, у которых критерий Био $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} < 0{,}1$. (здесь α – коэффициент теплопроводности, R – диаметр шара, λ - коэффициент теплопроводности материала)

Шуман использовал двухфазную модель, в которой дифференциальные уравнения теплообмена записаны для теплоносителя и твёрдых тел [8]. Им было принят ряд допущений: отсутствие конденсации или испарения при теплообмене, потерь тепла в окружающую среду и осевой и радиальной дисперсии. В работе [10] детально обсуждаются эти допущения, и указывается, в частности, на несоответствие некоторых из них для реальных накопителей. В работе [11] предложена коррекция критерия Bi для случая сферических тел при $Bi >> 0{,}1$. В работе [12] представлено определение эффективного коэффициента теплопередачи для сферических тел, плоских пластин, цилиндров с потоком теплоносителя, текущим вдоль их осей, а также накопителя с цилиндрическими каналами, по которым протекает теплоноситель. Аналогичная задача рассматривается в [13].

Для решения задач нестационарного теплообмена разработаны специальные пакеты программ - *FLUENT*, *CFX*, *STAR–CD*, *FINE* (*NUMECA*), *CFD–ACE* и др. Для нашей задачи наиболее подходящим является известный пакет *TRNSYS*, однако эти пакеты не всегда доступны. Подход, основанный на использовании дифференциальных уравнений, сопряжен с определенными трудностями при его реализации. Кроме того, в инженерных задачах целью расчета обычно являются энергетические показатели (накопленная энергия, длительность зарядки и др.), которые интегрально характеризуют накопитель. При этом точное распределение температур внутри накопителя не нужно.

В связи с этим нами предлагается упрощенный метод, основанный на решении алгебраических уравнений вместо дифференциальных уравнений в частных производных. При этом тела, представляющие в тепловом отношении систему с распределенными параметрами, заменяются системой с сосредоточенными параметрами – в виде электротепловой схемы замещения. При таком подходе вместо точного распределения температуры внутри тела рассчитывается некоторая интегральная температура, которая в определенном смысле представляет среднее значение между температурами поверхности и центра тела. Подробное изложение метода расчета эквивалентных параметров электротепловой схемы приведено в работе [14].

2. Метод расчёта нестационарного температурного поля насадки аккумулятора явного тепла

Накопитель (рис.2) в осевом направлении разбивается на M контрольных объёмов, ширина которых равна характерному размеру рабочего тела. Это может быть диаметр шара или цилиндра, длина цилиндра или параллелепипеда и т.д. Считается, что в пределах контрольного объёма тела находятся в идентичных условиях. Весь интервал времени нагрева или охлаждения разбивается на N конечных отрезков продолжительностью $\Delta\tau$.

Нестационарное температурное поле в накопителях с телами, аккумулирующих явное тепло, предлагается моделировать, используя трёхэлементную электротепловую схему замещения рабочих тел (рис.3), а в накопителях скрытого тепла схему, приведенную на рис.4. Заданными величинами являются граничные условия – начальное распределение температуры тел в накопителе, временная зависимость температуры и расхода теплоносителя на его входе.

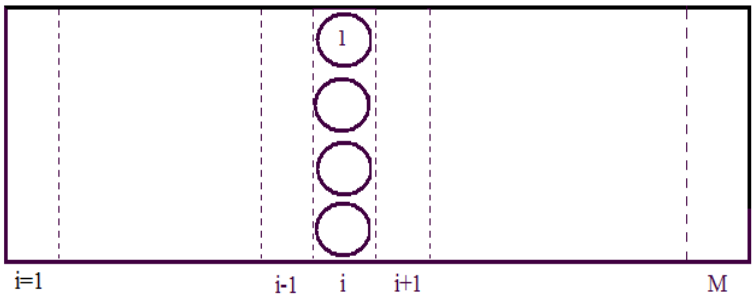


Рис.2. Схематическое изображение канала накопителя с рабочими телами правильной формы.(1-единичное рабочее тело; i - номер контрольного объёма).

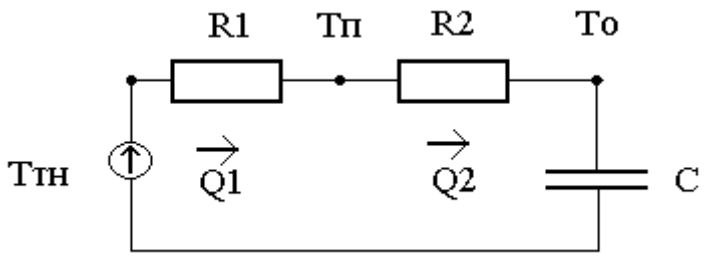


Рис. 3. Трёхэлементная электротепловая схема замещения рабочего тела накопителя явного тепла.

T_{TH} – температура теплоносителя; $T_{П}$ – температура поверхности рабочего тела; T_{O} – среднеобъёмная температура рабочего тела; R_1 – наружное тепловое сопротивление рабочего тела; R_2 – внутреннее тепловое сопротивление рабочего тела; C – теплоёмкость рабочего тела.

Для упрощения моделирования приняты следующие допущения:

1. Тела и расход потока теплоносителя по поперечному сечению канала накопителя распределены равномерно.
2. Теплопередача излучением и теплопроводностью между телами отсутствует, т.е. передача тепла происходит только конвекцией между теплоносителем и телами.
3. Процесс зарядки и разрядки накопителя происходит без потерь тепла через его теплоизоляцию.
4. Для аппроксимации временной зависимости температуры теплоносителя используется кусочно-постоянная функция.
5. Тепловыделением при трении теплоносителя о рабочие тела пренебрегаем.

При таких допущениях расчет нагрева и охлаждения тел в контрольных объёмах можно решать как одномерную задачу. На каждом интервале $\Delta\tau$ времени зарядки или разрядки аккумулятора рассчитываются средние (на интервале) значения величин:

Q_1 –тепловой поток от теплоносителя к телу;

Q_2 –тепловой поток от поверхности тела к тепловой ёмкости C;

T_{BX} –температура теплоносителя на входе контрольного объёма (кроме первого объёма, для которого эта температура задана по условию решаемой задачи);

$T_{BЫX}$ – температура теплоносителя на выходе из контрольного объёма;

ΔT_T – изменение среднеобъёмной температуры тела T_O на интервале $\Delta\tau$;

T_{TH} – средняя температура теплоносителя в контрольном объёме;

$T_{П}$ – средняя температура поверхности тела;

T_O – средняя по объёму температура тела (потенциал ёмкостного элемента C в схеме замещения на рис. 3).

Температуры в узлах электротепловой схемы замещения тела находим в рамках итерационного процесса методом узловых потенциалов [17].

Тепловой поток Q_1 рассчитывается по формуле:.

$$Q_1 = G_1 c_{TH} (T_{BX} - T_{BЫX}), \quad (1)$$

где G_1 и c_{TH} – соответственно массовый расход теплоносителя, приходящийся на одно тело, и его удельная массовая теплоёмкость [6].

Тепловой поток Q_2 находится из решения дифференциального уравнения для цепи, показанной на рис.3. При кусочно-постоянной аппроксимации температуры теплоносителя мгновенное значение теплового потока рассчитывается по формуле:

$$Q_2 = \frac{(T_{TH} - T_{OH})\exp(-\tau / \tau_T)}{(R_1 + R_2)}, \qquad (2)$$

где T_{OH} - значение среднеобъёмной температуры тела в начале интервала времени $\Delta\tau$. Константа экспоненты τ_T (постоянная времени цепи на рис.3) для расчёта температур тела находится по формуле:

$$\tau_T = C(R_1 + R_2) \qquad (3)$$

Тогда среднее на интервале $\Delta\tau$ значение теплового потока от теплоносителя к телу определяется по формуле:

$$Q_2 = \frac{\tau_T (T_{TH} - T_{OH})\{1 - \exp(-\Delta\tau / \tau_T)\}}{\Delta\tau (R_1 + R_2)} \qquad (4)$$

Из закона сохранения энергии следует равенство тепловых потоков Q_1 и Q_2.

Таким образом, для одного и того же теплового потока мы имеем два уравнения (1) и (4) с тремя неизвестными величинами: $T_{TH}, T_{OH}, T_{ВЫХ}$. Задача состоит в том, чтобы найти значения этих величин при условии $Q_1 = Q_2$. Для этого используется следующий подход. Закон распределения температуры теплоносителя в контрольном объёме находим, решая дифференциальное уравнение теплообмена, полагая поверхность тела изотермической, а температуру теплоносителя на входе контрольного объёма неизменной, как это делается для поверхностных теплообменников [16]. Решение этого уравнения приводит к экспоненциальному закону распределения температуры теплоносителя:

$$T_1 = T_П + (T_{BX} - T_П)\exp(-\frac{x}{\tau_B}) \qquad (5)$$

где T_1 - локальное значение температуры теплоносителя; $T_П$ - средняя температура поверхности тела; T_{BX} - температура теплоносителя на входе контрольного объёма.

Константа экспоненты τ_B рассчитывается по формуле:

$$\tau_B = K_1 \frac{G_1 c_{TH}}{\alpha B}, \qquad (6)$$

где K_1 – корректирующий коэффициент, обеспечивающий выполнение равенства $Q_1 = Q_2$; α - расчётный коэффициент теплоотдачи тела; B – гидродинамический периметр тела, зависящий от формы и расположения тела по отношению к потоку теплоносителя [16]. Его значение при теплообмене с плоским телом равно размеру этого тела в плоскости, нормальной к потоку теплоносителя. Так, для пластины прямоугольной

формы параметр B равен ширине пластины. Для цилиндра, ось которого совпадает с потоком, этот параметр равен длине окружности поперечного сечения тела. Для цилиндра с осью нормальной к потоку теплоносителя он равен длине образующей цилиндра. Для тела в форме шара параметр B равен отношению площади поверхности шара к его диаметру. В общем случае для тел произвольной формы, его значение можно определить только приближённо, используя понятие эквивалентного диаметра тела [6].

Константа τ_B в формуле (6) находится итерационным путём, варьируя K_1 в зависимости от разности тепловых потоков Q_1 и Q_2:

$$K_1 = K_2(Q_1 - Q_2), \tag{7}$$

где K_2 – коэффициент, который выбирается из условия устойчивости итерационного процесса. При этом очередные итерационные шаги переменные по значению и знаку определяются по результату расчёта на предыдущей итерации. Итерационный процесс заканчивается при условии достижения относительного значения разности тепловых потоков $Q_1 - Q_2$ допустимого уровня, задаваемого предварительно:

$$\Delta Q = \frac{Q_1 - Q_2}{\mathrm{Q}_1} \tag{8}$$

Средняя температура теплоносителя в контрольном объёме рассчитывается по формуле (9), полученной интегрированием выражения (5) в пределах от 0 до L.

$$T_{TH} = T_{\Pi} + \frac{\tau_B}{L}(T_{BX} - T_{\Pi})[1 - \exp(-\frac{L}{\tau_B})], \tag{9}$$

где L - определяющий размер тела, который как и гидродинамический периметр B зависит от формы, размеров и ориентации тела относительно потока теплоносителя [12,16].

Температура теплоносителя на выходе *i*-го контрольного объёма:

$$T_{BЫX} = T_{\Pi} + (T_{BX} - T_{\Pi})\exp(-\frac{L}{\tau_B}) \tag{10}$$

Значение среднеобъёмной температуры тела определяется, исходя из экспоненциального закона изменения мгновенной температуры тела:

$$T_0 = T_{TH} - (T_{TH} - T_H)\{1 - \exp(\frac{\Delta\tau}{\tau_T})\}, \tag{11}$$

где T_H – значение среднеобъёмной температуры тела в начале *k*-го интервала времени.

Расчёт нагрева тел осуществляется последовательно для всех контрольных объёмов, начиная с первого ($i = 1$), расположенного на входе канала накопителя (рис.2), используя в качестве граничного условия для i-го контрольного объёма температуру теп-

лоносителя на выходе ($i-1$)-го объёма, т.е. $T_{BX}[i]=T_{BЫX}[i-1]$. По формуле (11) рассчитывается среднеобъёмная температура тела на интервале времени Δτ. Значения этой температуры для каждого тела на (*k-1*)–м интервале времени служат в качестве начальных условий для расчётов на *k*–м интервале.

3. Метод расчёта нестационарного температурного поля насадки аккумулятора неявного тепла

В случае накопителя с рабочими телами, содержащими вещество с фазовым переходом, нами рассматривается система с подвижной границей раздела фаз с разным агрегатным состоянием вещества. Полагается, что фазовые превращения происходят при одной и той же температуре, т.е. отсутствует температурный гистерезис. Вещество помещено в ёмкости правильной формы, например, сферической, цилиндрической, прямоугольной и поверхности раздела зон с разным агрегатным состоянием вещества образуют симметричные области. Тела размещены в канале накопителя равномерно, образуя регулярную, проницаемую среду. Также как в случае накопителя явного тепла через эту среду прокачивается теплоноситель, который подаётся с торцов канала. Для зарядки накопителя подаётся горячий теплоноситель, температура которого должна быть выше температуры фазового перехода. В противном случае будет аккумулироваться только явное тепло. При разрядке накопителя через насадку прокачивается теплоноситель с температурой более низкой, чем при фазовом переходе.

В основе расчёта нестационарного температурного поля в слоевой насадке из тел с фазовым превращением материала лежит тот же метод, что и в случае аккумулятора явного тепла. Используется пространственно - временная дискретизация и последовательное вычисление для всех контрольных объёмов, начиная с первого, теплового состояния рабочих тел. Особенностью расчёта нагрева рабочих тел с фазовым превращением вещества является то, что нужно учитывать непостоянство их внутреннего теплового сопротивления во времени [14]. Кроме того, рабочие тела аккумулируют не только энергию фазового превращения, но и явное тепло. В связи с этим используется электротепловая схема замещения, приведенная на рис.4, параметры которой зависят от теплового состояния тел, т.е. момента времени и номера контрольного объёма.

Аналогия электрической и тепловой схем замещения состоит в том, что параметрам электрической схемы (потенциалу узла *U*, току ветви *I*, электрическому сопротивлению $R_{ЭЛ}$ и электрической емкости $C_{ЭЛ}$) ставятся в соответствие параметры тепловой схемы (температура *T*, поток тепла *Q,* тепловое сопротивлению R_T и теплоемкость C_T). Составленная таким образом (электротепловая) схема может быть рассчитана с помощью известных методов электротехники. В частности, в предлагаемом методе используется метод узловых потенциалов.

В соответствии с электротепловой схемой замещения (рис.4) внутреннее тепловое сопротивление тел на k-ом интервале времени содержит три составляющие: $R^{*}_{(k-1)}$– сопротивления зоны материала, претерпевшего фазовый переход за всё предыдущее время $\tau=\Delta\tau(k-1)$, $R^{**}_{(k)}$–сопротивления зоны материала, находящегося в стадии фазового перехода и $R^{***}_{(k+1)}$ - теплового сопротивления зоны с другим агрегатным состоянием вещества. Для этих зон потенциалы в узлах схемы: T^{*}– среднеобъёмная температура области рабочего тела, в которой произошло фазовое превращение; T^{**} – темпера-

тура фазового перехода вещества рабочего тела; T^{***} – среднеобъёмная температура зоны тела, в которой будет происходить фазовое превращение в момент времени τ.

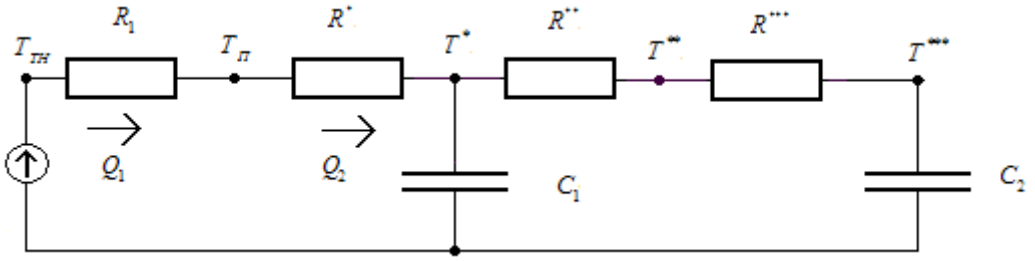


Рис.4. Электротепловая схема замещения рабочего тела
с фазовым переходом вещества.

Для упрощения выражений для расчётов весь процесс нестационарного теплообмена тел рассматривается с помощью модели, приведенной на рис.3 (этапы с одинаковым агрегатным состоянием вещества), и модели, приведенной на рис.4. Временные границы перехода из этапа в этап определяются по температурам в узлах электротепловой схемы и размерам вышеуказанных зон. Таким образом, для первого и третьего этапов применяется методика расчёта нестационарного теплообмена, рассмотренная выше для тел, аккумулирующих явное тепло, поскольку вещество на этих этапах не претерпевает фазового перехода.

Здесь также, как и в случае накопления явного тепла, необходимо, чтобы выполнялось равенство $Q_1 = Q_2$ (рис.4). Для этого в рамках итерационного направленного поиска осуществляется расчёт температур в узлах электротепловой схемы, значений тепловых сопротивлений зон, постоянной времени τ_B, коэффициента K_1 по вышеприведенным формулам.

Поскольку температура фазового перехода вещества тела T^{**} известна, тепловой поток Q_2, используя закон Ома для участка цепи, рассчитываем по формуле:

$$Q_2 = \frac{(T_{TH} - T^{**})}{(R_1 + R^* + R^{**})} \qquad (12)$$

Для расчёта $R^{**}_{(k)}$ определяется энергия теплообмена E_{TO}, которая равна энергии, необходимой для фазового превращения вещества $E_{ФП}$:

$$E_{TO} = E_{ФП} = \Delta\tau Q_2 \qquad (13)$$

По этой энергии и удельной энергии фазового перехода рассчитывается объём вещества, претерпевшего фазовый переход, а по нему геометрический размер зоны этого вещества. Зная размеры и теплофизические параметры этих зон, рассчитываются их тепловые сопротивления [16]. Так, например, для тела цилиндрической формы, пренебрегая теплообменом по торцам цилиндра, и шарообразной формы, полагая, что соблюдается симметрия зон с разным агрегатным сопротивлением, для теплового сопротивления этих зон применяем формулы, приведенные в работе [16]:

$$R^{**}{}_{Ц} = \frac{\ln(\frac{d_1}{d_2})}{2\pi h\lambda} \qquad (14)$$

$$R^{**}{}_{Ш} = \frac{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}}{2\pi\lambda}, \qquad (15)$$

где d_1 и d_2 – соответственно наружный и внутренний радиус зоны; λ – удельная теплопроводность материала зоны.

Расчёт, как и в случае накопителя явного тепла, осуществляется последовательно для всех контрольных объёмов $i = 1, 2, ..., M$ и интервалов времени $k = 1, 2, ..., N$, применяя вышеописанный итерационный процесс. Рассчитываются значения тепловых потоков, энергии переданной от теплоносителя к телу, массы и объёма вещества, претерпевшего фазовый переход, а также тепловые сопротивления для зон вещества с разным агрегатным состоянием. Тела, расположенные в разных контрольных объёмах, находятся в разных тепловых состояниях, для них используются модели и теплофизические параметры, соответствующие вышеуказанным трём этапам, с характерными агрегатными состояниями вещества. Среднее на интервале Δτ внутреннее тепловое сопротивление зоны R^{**}, в которой происходит фазовое превращение вещества, находится при итерационном поиске постоянной экспоненты τ_B. Итерации заканчиваются при выполнении условия (9). Значение сопротивления R^* (рис.4) определяется в результате расчёта на предыдущем интервале времени, используя теплофизические параметры материала, соответствующие его агрегатному состоянию.

Несколько замечаний относительно выбора значения временного интервала $\Delta\tau$ для аккумулятора явного тепла. В основе предложенного метода расчёта лежит использование электротепловой схемы замещения, параметры которой находятся из условия регулярности теплового режима тела [14]. Поэтому должно выполняться условие $\Delta\tau \geq \tau_{ИР}$. Упомянутое в начале статьи условие $Bi < 0{,}1$ обеспечивает практическое отсутствие иррегулярного режима, однако по условиям задач оно может не выполняться. Другим условием может быть отношение разности между температурами в центре тела и теплоносителя к разности температур на его поверхности и теплоносителем [9]. Однако для определения продолжительности иррегулярного теплового режима по этому условию требуется находить точное решение для вышеуказанных разностей температур, изменяя временной интервал. Это приводит к большим затратам времени на расчёты, но не устраняет проблемы определения верхнего предела для бесконечного ряда точного решения [14]. Мы предлагаем более простой и быстрый путь для определения продолжительности $\tau_{ИР}$. Продолжительность иррегулярного теплового режима в первом приближении для тел правильной формы можно определить по формуле:

$$\tau_{ИР} = 3\tau_2, \qquad (17)$$

где τ_2 – постоянная экспоненты второго члена бесконечного ряда для точного решения задачи нестационарного теплообмена с граничными условиями третьего рода [9].

Зная $\tau_{ИР}$, можно определить продолжительность иррегулярного теплового режима и минимально допустимую длительность временного интервала $\Delta\tau$. Максимальное значение $\Delta\tau$ мы рекомендуем ограничить трёхкратным значением полной тепловой постоянной времени тела, определяемой по формуле (3).

В случае накопителей с фазовым переходом граничные значения интервала $\Delta\tau$ в первом приближении могут быть приняты по вышеуказанным критериям.

4. Заключение

Предложенный метод позволяет производить расчёт нестационарного температурного поля в накопителях со слоевой насадкой, как при постоянных, так и при переменных параметрах теплоносителя. Тела насадки могут быть с твёрдым или жидким аккумулирующим веществом, а также материалов с фазовым переходом. Использование сравнительно больших шагов для дискретизации по времени и пространству позволяет моделировать большие интервалы времени работы.

Данный метод расчёта нестационарного температурного поля положен в основу специальной программы, в которой рассчитываются энергетические характеристики накопителей. Программа позволяет моделировать многократные циклические процессы зарядки и разрядки накопителей при произвольных краевых условиях

5. Пример расчёта

В качестве примера на рис.5 и 6 приведены результаты сопоставления расчётов по разработанной методике и экспериментальных данных, приведенных в работах [18] и [19]. На этих рисунках сплошными линиями показаны экспериментальные данные, а точками расчётные.

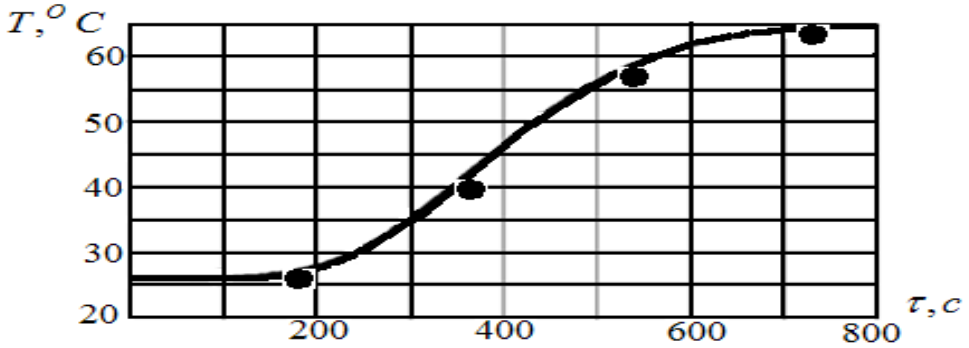


Рис. 5. Переходная характеристика аккумулятора тепла со стальными шариками, имеющими диаметр 5,56мм [18].

На рис.6 приведено распределение температуры по длине канала аккумулятора тепла с каменной насадкой из гальки, имеющей λ = 0,5 Вт/(мК), c_y =920Дж/(кг К) и коэффициент тепловой диффузии $a=3{,}4\times10^{-7}$ м^2/с при удельном расходе воздуха через поперечное сечение аккумулятора G=0,123кг/(с м^2). Из этих рисунков видно, что расчётные значения, полученные по разработанной нами методике, достаточно точно соответствуют экспериментальным данным.

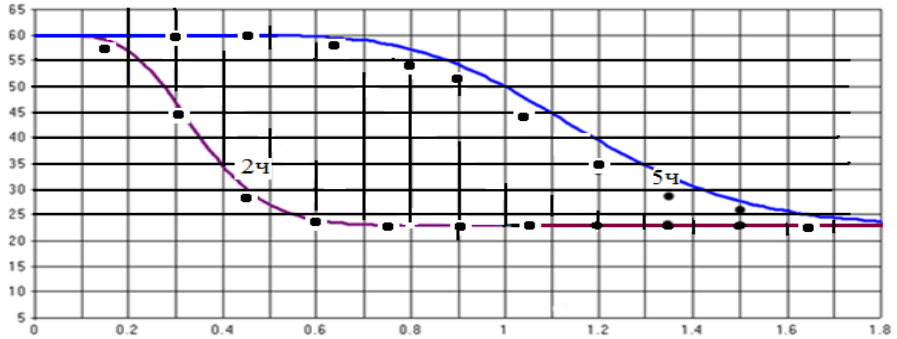


Рис.6. Распределение температуры воздуха по длине канала аккумулятора с воздушным теплоносителем при его зарядке для двух моментов времени (2 и 5часов) [19].

Литература

[1] Dincer I. and Rosen M. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. West Sussex, England : John Willey &Sons. 2002.

[2] Левенберг В. Д. Аккумулирование тепла / Левенберг В. Д., Ткач М. Р., Гольстрем В. А. — К. : Техника, 1991.

[3] Dutil Y., Rousse D., Salah N., Lassue S.and Zalewski L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011), 112–130.

[4] Ermuratschii Vl., Ermuratski Vas. Acumulatorul de caldura sau frig. Inregistrarea modelului de utilitate MD №191 12 2008.08.31.

[5] Ermuratschii Vl., Ermuratski Vas. Colector-acumulator de caldura/frig natural. Brevet de invenție MD4066 C1 2010.08.31.

[6] Duffie J. and Beckman W. Solar Engineering of Solar Processes. -3rd.ed. J.Wiley and Sons. 2006, pp.908.

[7] Singh R., Saini R.and Saini J. Models for predicting Thermal Performance of Packed Bed Energy Storage System for Air Heaters – A Review. The Open Fuels & Energy Science Journal, 2009, 2, 47- 53/.

[8] Schumann, T.E.W., 1929. Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. Journal of the Franklin Institute 208 (3), 405–416.

[9] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. Высшая школа. 1967. 599с.

[10] Hughes, P.J., Klein, S.A., Close, D.J., 1976. Packed bed thermal storage models for solar air heating and cooling systems. ASME Journal of Heat Transfer 98 (2), 336–338.

[11] Jeffreson, C.P., 1972. Prediction of breakthrough curves in packed beds: 1.Applicability of single parameter models. American Institute of Chemical Engineers 18 (2), 409–416.

[12] Исаченко В.П.,Осипова В.А. и Сукомел А.С. Теплопередача. М. Энергоиздат. 1981.417с.

[13] Xu B., Li P. and Chan L. Extending the validity of lumped capacitance method for large Biot number in thermal storage application.2012. Solar Energy V.86 pp.1709–1724.

[14] Ермуратский В.В., Грицай М.А. Расчёт внутреннего теплового сопротивления рабочих тел аккумуляторов явного и скрытого тепла.
Problemele energeticii regionale, 3(23) 2013, p. 98-106.

[15] Cortes C., Campo A., Arauzo I. Reflections on lumped models of unsteady heat conduction in simple bodies. International Journal of Thermal Sciences 42 (2003), 921–930.

[16] Leca A., Mladin E-C., Stan M. Transfer de căldură şi masă – o abordare inginerească. Ed. Tehnică. Bucureşti. 1998. 783p.

[17] Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и Страхов С.В.Основы теории цепей. М-Л. Энергия. 1965. 444с.

[18] Saez A. and McCoy B. Dynamic response of a packed bed thermal storage system - a model for air heating. Sol.Energy 1982.29(3), 201-206.

[19] Sullivan H., Hollands K.and Shewen E. Thermal destratification in rock beds. Techical note. Sol.Energy 1984.33(2), 227-229.

Сведения об авторах
Ермуратский Владимир Васильевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интере-

сов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, энергетическая эффективность, тепло-энергетика, теплотехника. E-mail: **ermuratskie@gmail.com**

Грицай Михаил Андреевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, ведущий научный сотрудник, к.т.н., Область научных интересов: математическое моделирование электрических сетей и систем. E-mail: **mgrine@ie.asm.md**