АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА

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

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению сценария интегрирования правобережной части энергосистемы Молдовы в ENTSO-E. В работе предложены и проанализированы различные варианты развития генерирующих мощностей на территории правобережной части республики с учетом положений Энергетической Стратегии Республики Молдова до 2030 года. Для каждого предложенного варианта развития генерации проведен анализ нормальных режимов с точки зрения потерь активной мощности, как по энергосистеме в целом, так и по отдельным ее элементам с дифференциацией по классам напряжения. Выполнены расчеты и оценка коэффициентов запаса статической устойчивости по активной мощности и по напряжению, оценен импорт/экспорт электроэнергии, проанализирован ряд других показателей режима. В результате сравнительного анализа были выбраны наиболее технически эффективные, по мнению авторов, варианты.
Ключевые слова: Запас устойчивости энергосистемы, ENTSO-E, объединенная энергосистема, установившийся режим, потери активной мощности, генерирующие мощности.

ANALIZA VARIANTELOR DEZVOLTĂRII PUTERILOR DE GENERARE PE TERITORIUL MOLDOVEI

Zaiţev D., Golub I., Kalinin L, Tîrşu M.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. Articolul este dedicat examinării scenariului de integrare al sistemului electroenergetic a Malului Drept al Moldovei în ENTSO-E. În lucrare sunt propuse şi analizate diferite variante de dezvoltarea a puterilor de generare de pe teritoriul părţii drepte al Republicii cu luarea în considerare a dispoziţiilor Strategiei energetice a Moldovei până în a. 2030. Pentru fiecare variantă de dezvoltare a generării propusă este efectuată analiza regimurilor normale în vederea pierderilor de putere activă cât a sistemei energetice în întregime, atât şi pentru elemetele ei separate cu diferenţiere după clasa de tensiune. Au fost efectuate calcule şi evaluarea coeficienţilor de siguranţă a stabilităţii statice pentru puterea activă şi tensiune, a fost estimat importul/exportul de energie electrică, s-a analizat un şir de indicatori ai regimului. În rezultatul analizei comparative au fost selectate cele mai eficiente variante tehnice din punctul de vedere al autorilor.
Cuvinte-cheie: Rezervă de stabilitate a sistemului energetic, ENTSO-E, sistem energetic unificat, regim stabilizat, pierderi de putere activă, puteri generatoare.

ANALYSIS OF DEVELOPMENT OPTIONS FOR GENERATING CAPACITY IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA

Zaitsev D., Golub I, Kalinin L, Tirshu M.
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paperwork deals with analysis of scenario concerning integration of Moldova's right bank power system to ENTSO-E. In the paperwork are proposed and analyzed different variants of generation capacity development on the territory of republic's right bank considering tasks mentioned in the Energy Strategy of Republic Moldova by 2030. For every proposed variant of generation capacity development the analysis of normal modes regarding active power losses was performed for both in whole power system and separately in every of their elements with differentiation by voltage levels. There were performed the computation and estimation of coefficients of static stability reserve by active power and by voltage and also were estimated the import/export of electrical energy as well as were analyzed many other modes of indicators. As result of comparative analysis, the more technical effective variants (in author's opinion) were selected.
Keywords: Reserve of power system stability, ENTSO-E, unified power system, static mode, losses of active power, generation capacity.

Введение

В настоящее время вопросам развития генерирующих мощностей и параллельной работы энергосистем в рамках ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators For Electricity), а также вопросам исследования, моделирования и анализа режимов энергосистем уделяется серьезное внимание [1-6]. Одно из направлений научных исследований, проводимых в ИЭ АНМ, также связанно с разработкой и анализом вариантов развития энергосистемы Республики Молдова в контексте присоединения к ENTSO-E [7-10]. Реализация обозначенного сценария может привести к существенному снижению собственных генерирующих мощностей из-за отключения МГРЭС. В связи с этим, представляется актуальной задача определения мест развития генерации в правобережной части Республики.

Сравнительный анализ различных вариантов развития генерирующих мощностей в рамках выбранного сценария в конечном счете может определить принятие того или иного технического решения.

При построении базовой расчетной модели, предусматривающей интегрирование правобережной части энергосистемы Республики Молдова в ENTSO-E за основу был принят режим зимнего максимума, на 2015-2020 год, полученный в результате выполнения проекта развития системы электропередач в регионе черноморского бассейна (Black Sea Transmission Project). Модель, выполненная в формате PSS/E, была конвертирована и адаптирована для работы в среде RastrWin, применяемой в ИЭ АНМ для моделирования и расчета нормальных режимов.

Анализ, проведенный в [10] показал, что отсоединение энергосистемы Молдовы от Украины и Днестрэнерго, с возможной потерей генерирующих источников МГРЭС, приводит к увеличению потерь активной мощности, снижению запаса статической устойчивости, невозможности диверсифицировать импорт электроэнергии и, как следствие, к существенному снижению уровня энергобезопасности страны и надежности энергоснабжения потребителей. Частично решить выше обозначенные проблемы можно за счет развития генерирующих мощностей на территории Республики Молдова. В Энергетической Стратегии Республики Молдова до 2030 года [11] существенное место уделено развитию генерирующих источников, в частности Кишиневской ТЭЦ, мощность которой должна быть доведена до 650 МВт. При моделировании режимов в рамках развития генерации в Кишиневском энергоузле подразумевалось, что наращивание генерирующих мощностей будет осуществляться на базе КТЭЦ-2 и модернизированная станция будет называться КТЭЦ-3. Кроме этого в настоящей работе рассматриваются и анализируются варианты развития генерирующих узлов на севере республики (Бельцкий энергоузел 450 МВт), в западной части (Унгенский энергоузел 450 МВт) и в южной части страны (Вулканештский энергоузел, с. Бурлачены 450 МВт) (рис.1).

Сравнительный анализ вариантов, предусматривающих развитие генерирующих мощностей

Для сравнительного анализа были выбраны следующие варианты:

1. Вариант базовый;
2. Вариант развития генерирующих мощностей в центральной части республики (Кишинев КТЭЦ-3 мощностью 650 МВт);
3. Вариант развития генерирующих мощностей в центральной части республики (Кишинев КТЭЦ-3 мощностью 650 МВт) и усилением сети 110 кВ;

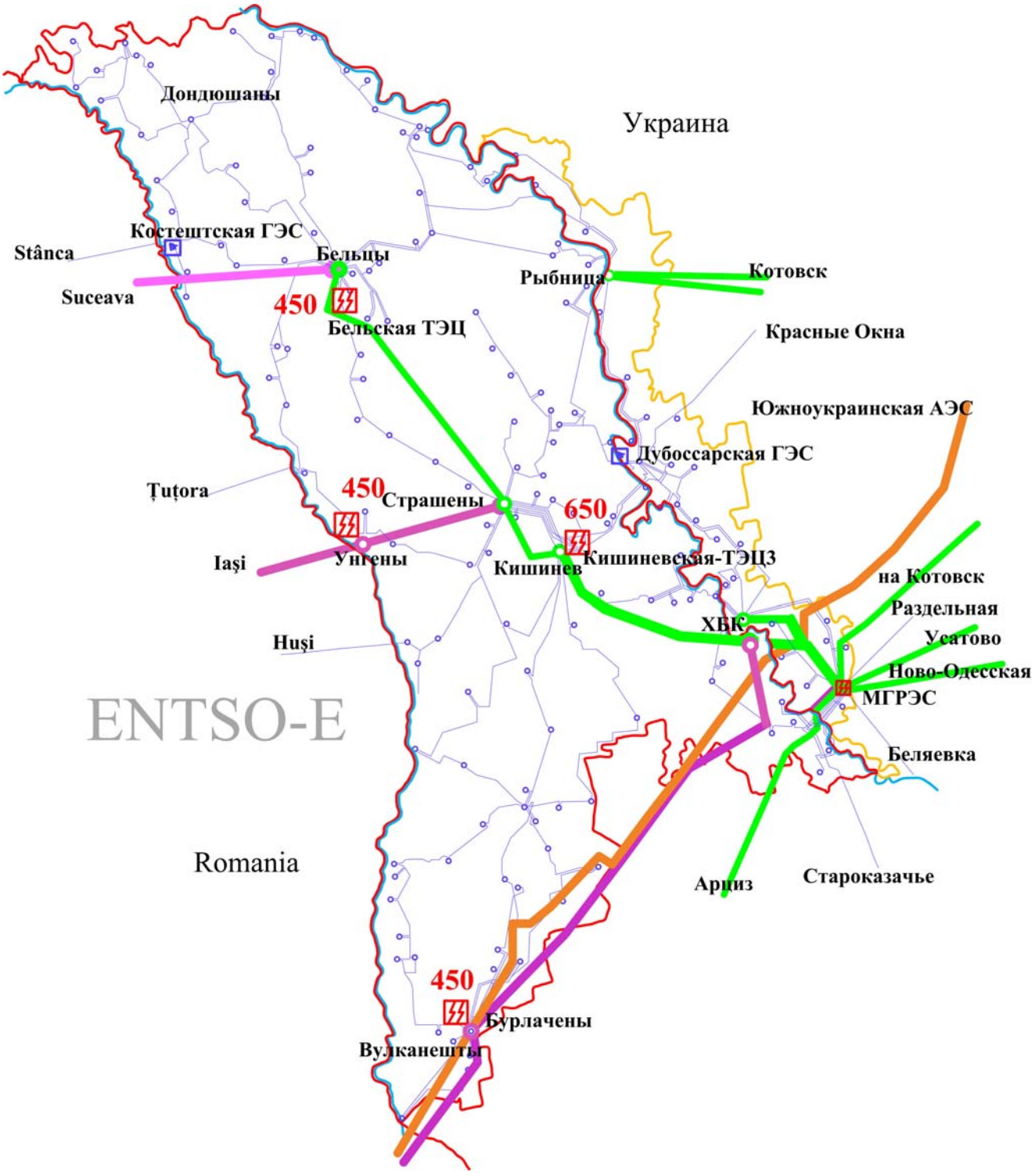


Рис. 1 Возможное размещение генерирующих мощностей в Молдавской энергосистеме.

4. Вариант развития генерирующих мощностей в центральной части республики (Кишинев КТЭЦ-3 мощностью 650 МВт) и усилением сети 330 кВ;
5. Вариант развития генерирующих мощностей в центральной части республики (Кишинев КТЭЦ-3 мощностью 650 МВт) с переводом ПС Дондюшаны на 330 кВ и сооружением ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы;

6.Вариант развития генерирующих мощностей в южной части республики (Бурлачены мощностью 450 МВт);
7.Вариант развития генерирующих мощностей в северной части республики (Бельцы мощностью 450 МВт);
8.Вариант развития генерирующих мощностей в западной части республики (Унгены мощностью 450 МВт).

Параметры для сравнительного анализа предлагаемых вариантов приведены в таблице 1, где:
$\Delta P_{рум}$ - потери активной мощности в энергосистеме Румынии;
ΔP - потери активной мощности в энергосистеме Молдовы;
ΔP_{110} - потери активной мощности в сетях 110 кВ Молдовы;
ΔP_{330} - потери активной мощности в сетях 330 кВ Молдовы;
ΔP_{400} - потери активной мощности в сетях 400 кВ Молдовы;
$P_{ВН}$ – мощность внешнего перетока;
$K_р$ – коэффициент запаса статической устойчивости Молдавской энергосистемы по активной мощности;
K_{U1} – коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению, рассчитанный для критического уровня напряжения в контролируемом узле, соответствующего границе статической устойчивости по активной мощности Молдавской энергосистемы;
K_{U2} – коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению, рассчитанный для критического уровня напряжения в контролируемом узле, соответствующего границе статической устойчивости электродвигателей в Молдавской энергосистемы;

Таблица 1. Параметры для сравнительного анализа

Режим	База	База + КТЭЦ-3 (650 МВт)	База + КТЭЦ-3 (650 МВт)+усиление 110 кВ	База + КТЭЦ-3 (650 МВт)+усиление 330кВ	База+КТЭЦ3 (650 МВт)+ ВЛ330кВ Бельцы-Дондюшаны+ ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы	База + ТЭС Бурлачены 450 МВт	База + ТЭС Бельцы 450 МВт	База + ТЭС Унгены 450 МВт
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta P_{рум}$, МВт	280,1	277,3	277,4	277,3	276,5	282,2	275,5	275,6
ΔP, МВт	23,5	30,5	26,7	23,8	29,0	25,6	17,2	17,6
ΔP_{110}, МВт	13,71	22,84	19,1	15,95	21,53	16,33	10,44	11,25
ΔP_{330}, МВт	1,93	1,54	1,5	1,76	1,35	2,56	2,62	1,05
ΔP_{400}, МВт	4,88	0,44	0,44	0,46	0,78	3,53	1,19	2,3
ΔP, %	2,89	3,72	3,27	2,93	3,55	3,14	2,14	2,18
$P_{ВН}$, МВт	-565,7	-143,7	-139,9	-137	-142,0	-118,0	-109,5	-110,0
$K_р$, о.е.	0,396	0,846	0,85	0,858	0,872	0,775	0,863	0,88
K_{U1}, о.е.	0,25	0,306	0,27	0,304	0,316	0,184	0,213	0,289
K_{U2}, о.е.	0,233	0,238	0,236	0,242	0,25	0,227	0,25	0,245

Для удобства сравниваемые параметры приведены также на диаграммах. Так уровень потерь в энергосистемах Молдовы и Румынии приведен соответственно на рис.2 и рис.3.

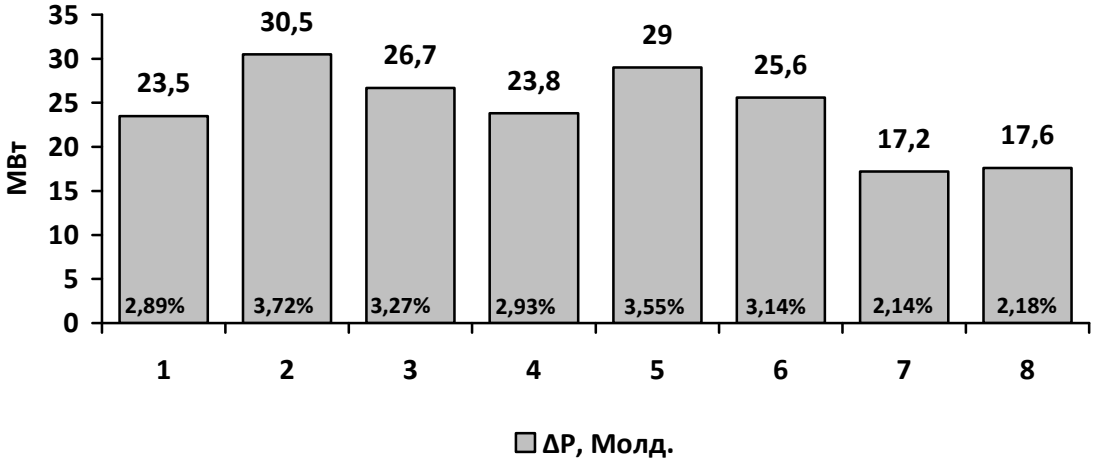


Рис.2. Потери активной мощности в Энергосистеме Молдовы при различных вариантах развития генерирующих мощностей в МВт в %.

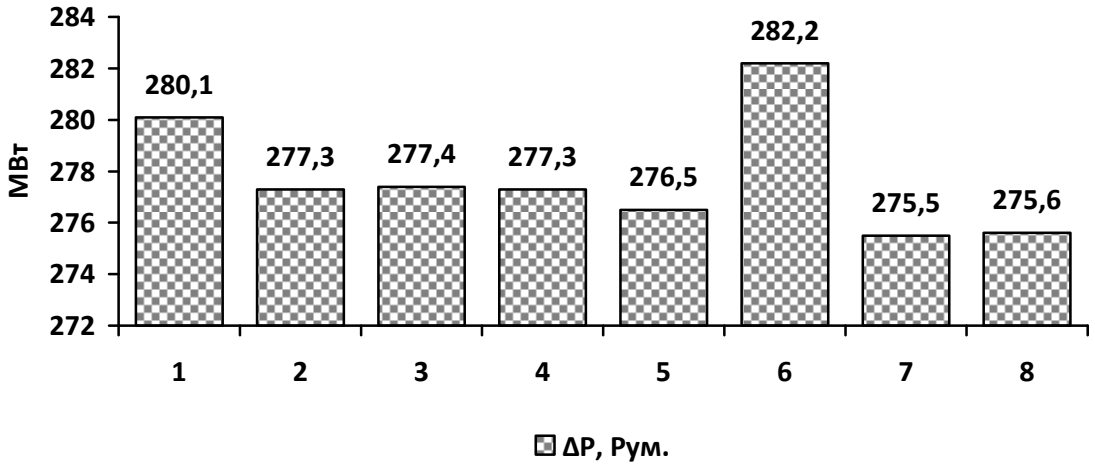


Рис.3. Потери активной мощности в Энергосистеме Румынии при различных вариантах развития генерирующих мощностей в Молдавской энергосистеме

Из анализа диаграмм рис.2 и рис. 3 видно, что с точки зрения снижения потерь активной мощности в Молдавской энергосистеме наиболее предпочтительным является вариант с постройкой электростанции мощностью 450 МВт в г. Бельцы (вариант 7). Потери в этом режиме снижаются по сравнению с базовым (вариант 1) на 6,3 МВт. Также привлекательно выглядит вариант с развитием генерирующих мощностей в г. Унгены (вариант 8) (снижение общих потерь на 5,9 МВт). Однако, в отличии от варианта 7, он требует строительства ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы для обеспечения возможности выдачи мощности станции. Потери в энергосистеме Румынии также снижаются по отношению к базовому режиму на величину 5,5 МВт и 5,4 МВт соответственно.

Вариант, предусматривающий доведение мощности КТЭЦ до 650 МВт (вариант 2) приводит к увеличению потерь мощности на 7 МВт. Возрастание уровня потерь происходит из-за неоптимальной, по мнению авторов, схемы выдачи мощности КТЭЦ3. Попытки усилить сечение для выдачи по сети 110 кВ (вариант 3) приводят к снижению потерь на 3,8 МВт, а по сети 330 кВ (вариант 4) к снижению потерь на 6,7 МВт приближаясь к значению в базовом режиме. Однако в этом случае необходимо предусмотреть постройку двухцепной ВЛ330кВ КТЭЦ3- Страшены, что потребует существенных капитальных затрат.

Размещение электростанции мощностью 450 МВт в южной части страны (с.Бурлачены) (вариант 6) приводит к некоторому увеличению (на 2,1 МВт) потерь в энергосистеме Молдовы по сравнению с базовым режимом, кроме того незначительно возрастают потери в энергосистеме Румынии.

Что касается варианта с КТЭЦ-3 в комбинации с ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы (вариант 5), то потери активной мощности в республиканской энергосистеме возрастают по отношению к базовому режиму на 6,5 МВт. Это также показывает, что при реализации этого варианта встает необходимость решения проблемы выдачи мощности КТЭЦ3.

Характер распределения потерь активной мощности по сетям различного класса напряжения для сравниваемых сценариев приведен на рис.4. Видно, что при реализации вариантов развития генерирующих мощностей на территории Республики Молдова минимальный уровень потерь в сети 110 кВ (основная составляющая потерь по величине) достигается при постройке электростанции в г. Бельцы и в г. Унгены (10,44 МВт и 11,25 МВт соответственно, вариант 7,8). Потери в сетях 330 кВ минимальны при реализации сценария возведения электростанции в г. Унгены (1,05 МВт) (вариант 8). Максимальное значение потерь в сети 330 кВ достигается при вводе в эксплуатацию станции в г. Бельцы (2,62 МВт) (вариант 7). Что касается потерь в сети 400 кВ, то исключая базовый (вариант 1), максимальные потери достигаются при постройке электростанции в Бурлаченах (3,53 МВт) (вариант 6), минимальные в сценариях с КТЭЦ3 (0,44-0,46 МВт) (варианты 2-5).

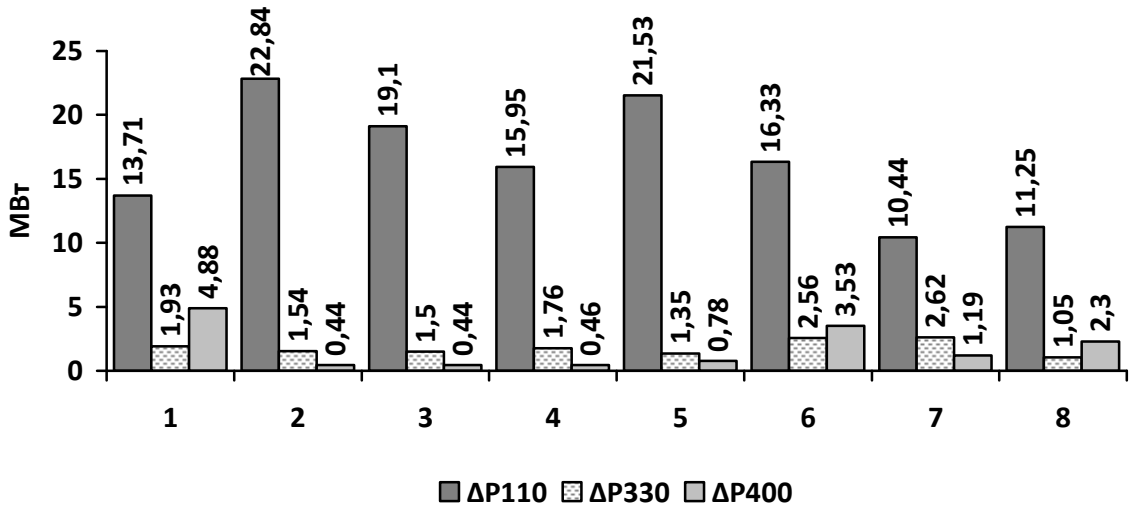


Рис.4. Потери активной мощности в энергосистеме Молдовы в сетях различных классов напряжения при различных вариантах развития генерирующих мощностей

Как видно из рис. 5, любой из вариантов развития генерирующих мощностей естественно приводит к значительному снижению импорта электроэнергии.

Минимальный уровень импортируемой электроэнергии зафиксирован для вариантов с ТЭС в г. Бельцы и ТЭС г. Унгены (109,5 МВт и 110 МВт, вариант 7 и 8 соответственно).

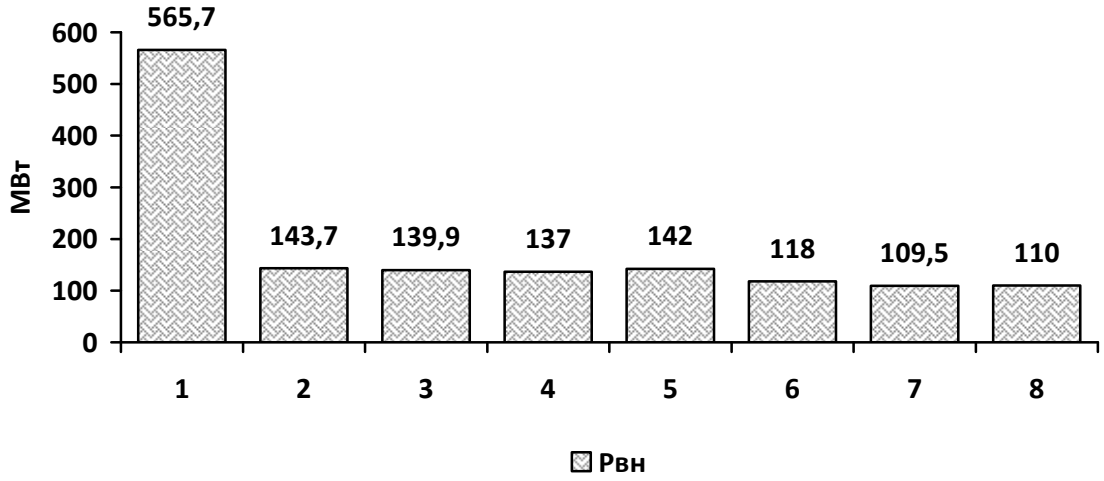


Рис.5. Мощность, импортируемая Молдовой для покрытия собственной нагрузки при различных вариантах развития системообразующей сети

Из анализа рис. 5. видно, что наиболее оптимальный вариант позволяет снизить импортные перетоки на 456,2 МВт.

На рис. 6 приведена информация по коэффициентам запаса статической устойчивости по активной мощности и по напряжению для различных вариантов развития генерирующих мощностей на территории Республики Молдова, рассчитанных с использованием методики [12].

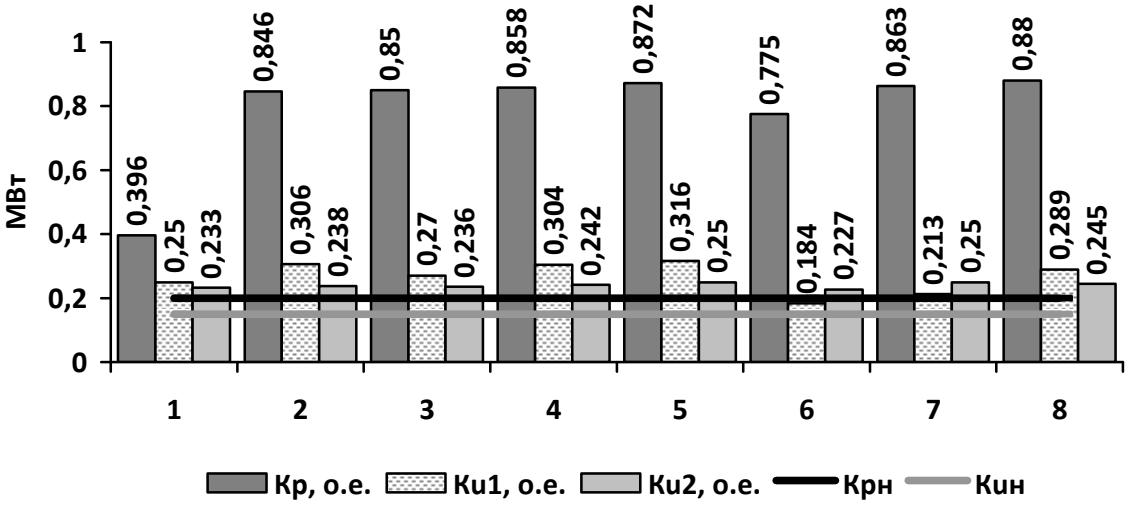


Рис.6. Диаграмма коэффициентов запаса статической устойчивости по активной мощности и по напряжению для различных вариантов развития генерирующих мощностей в Республике Молдова

Анализируя диаграмму рис.6 можно сделать следующие выводы:

- Показатели запаса статической устойчивости для всех рассматриваемых вариантов находятся выше нормативных показателей;
- Максимальный запас по активной мощности достигается при включении в расчетную модель ТЭС в г. Унгены и ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы (88,0%) (вариант 8), а также ТЭС в г. Бельцы (86,3%) (вариант 7), что несколько выше аналогичных показателей в остальных вариантах развития генерации. Коэффициент запаса в базовом режиме приведен для сравнения и, естественно, существенно ниже показателей в остальных вариантах;
- Запас по напряжению колеблется от 23% до 25% при нормативе 15% во всех рассматриваемых случаях.

Таким образом, наиболее перспективными с точки зрения значений анализируемых параметров, можно считать варианты со строительством электростанции в г.Бельцы (вариант 7), а также в г. Унгены (вариант 8). Эти сценарии имеют приблизительно одинаковые характеристики. Однако для реализации последнего необходима ВЛ400 кВ Страшены-Унгены-Яссы, что потребует значительных капитальных затрат. Поэтому, по мнению авторов исследования, наиболее оптимальным решением представляется создание дополнительных генерирующих мощностей в г. Бельцы.

Выводы

В работе проведен сравнительный анализ вариантов развития генерирующих источников на территории Республики Молдова в рамках реализации сценария присоединения страны к ENTSO-E без Украины и Приднестровья. Показано, что развитие собственных источников энергоснабжения приводит к увеличению запаса статической устойчивости по активной мощности и напряжению, снижению потерь активной мощности в сетях всех классов напряжения и, как следствие, повышению уровня надежности электроснабжения потребителей. На основе анализа выбранных показателей предложен наиболее оптимальный вариант, позволяющий обойтись без дополнительного сетевого развития.

Литература

[1] Gartia, A.; Nallarasan; Barnwal, S.P.; Madhukar, G., Power system network modeling for on-line analysis.Power Systems, 2009. ICPS '09. International Conference on Publication Year: 2009, Page(s): 1 – 6.
[2] Hoang Huu Than, Interconecting National Power System Though Boundary — Viewing point from power systemregimes. Science and Technology, 2011 EPU-CRIS International Conference on 2011 , Page(s): 1 – 4.
[3] Jia Hongjie; Yu Xiaodan, A simple method for power system stability analysiswith multiple time delays. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 2008, Page(s): 1 – 7.
[4] Sybille, G.; Hoang Le-Huy, Digital simulation of power systems and powerelectronics using the MATLAB/Simulink PowerSystem Blockset. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE 2000, Page(s): 2973 - 2981 vol.4.
[5] Tor O.B., Gencoglu C., Yilmaz O., Cebeci E., Guven A.N., Damping measures against prospective oscillations between Turkish grid and ENTSO-E System. Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on 2010, Page(s): 1 – 7.
[6] Arestova A., Hager, U., Grobovoy, A., Rehtanz C., SuperSmart grid for improving system stability at the example of a possible interconnection of ENTSO-E and IPS/UPS. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim 2011, Page(s): 1 – 8.

[7] Л.Калинин, Д.Зайцев, М.Тыршу, И.Голуб, Варианты развития транспортной сети Молдовы при параллельной работе с энергосистемой Украины, Problemele energeticii regionale. nr.1(18)/2012. http://ieasm.webart.md/data/m71_2_186.pdf .
[8] Л.Калинин, Д.Зайцев, М.Тыршу, И.Голуб, Анализ возможностей повышения надежности работы транспортной сети молдовы при синхронной работе с ENTSO-E., Международный семинар "Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях", 17-21 сентября 2012г, Баку.
[9] Л.Калинин, Д.Зайцев, М.Тыршу, И.Голуб, Влияние межсистемных связей 110кВ на уровень потерь активной мощности в энергосистеме Молдовы, Problemele energeticii regionale. nr.2(19)/2012. http://ieasm.webart.md/data/m71_2_202.pdf .
[10] Д.Зайцев, И.Голуб, Л.Калинин, М.Тыршу, Характеристика режима при реализации сценария интегрирования правобережной части энергосистемы республики Молдова В ENTSO-E., Problemele energeticii regionale. nr.2(22)/2013. http://ieasm.webart.md/data/m71_2_239.pdf .
[11] Энергетическая Стратегия Республики Молдова до 2030 года. (МО№27-30, st.№146, 08.02-2013).
[12] www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/Metod_uk_ust.pdf.

Сведения об авторах

Зайцев Дмитрий Александрович 10.04.1963. 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.

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.

Калинин Лев Павлович 31.07.1934. 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.

Тыршу Михаил Степанович 27.02.1972. Окончил Технический университет Молдовы в 1994 г. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И УЧАСТКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6…35 КВ

Нараева Р.Р. , Хусаинов Ш.Н.
Южно-Уральский Государственный Университет, г.Челябинск, Россия

Аннотация. Исследован метод определения параметров и участка повреждения изоляции в сетях 6…35 кВ с изолированной нейтралью на основе измерения режимных параметров сети. В рассматриваемой трехфазной цепи с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой произошло повреждение изоляции в одной из фаз. Расчеты проводятся для схемы замещения линии с отпайкой методом узловых потенциалов. Исследование влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения разных участках сети на точность определения проводимости изоляции проводится с использованием данных из цифровых моделей. Исследование данного метода ведется с выдвижением гипотез о месте повреждения и с учетом влияния кратности увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класса точности измерительных приборов.
Ключевые слова: Цифровая модель, гипотезы повреждения, суммарная проводимость изоляции, активная проводимость.

STUDIUL INFLUENȚEI DIFERIȚOR FACTORI ASUPRA DETERMINĂRII PRECISE A PARAMETRILOR ŞI A PĂRȚILOR DETERIORATE A IZOLAȚIEI ÎN REȚELE DE DISTRIBUȚIE 6...35 kV

Naraeva R.R., Husainov S.N.
Universitatea Ural-SUD, Celiabinsk, Federația Rusă

Rezumat. S-a studiat o metodă de determinare a parametrilor secțiunilor deteriorate a izolației fazei în rețelele de 6 ... 35 kV izolat neutru prin măsurarea parametrilor de modul de rețea. În circuitul trifazat studiat cu o sursă simetrică de EMF şi sarcină simetrică defecte au avut loc defecte de izolație în una din faze. Calculele sunt efectuate pentru un circuit echivalent cu linie cu derivație prin metodă potențialelor nodale. Investigația influenței valorilor de conductivitate a izolației în diferite locuri deteriorate ale rețelei la precizia determinării conductivității izolației se efectuează cu ajutorul modeleleor numerice. Studiul metodei date se efectuează cu înaintarea ipotezelor despre locul avariat şi influența clasei de precizie a instrumentelor de măsurat.
Cuvinte-cheie: Modelul numeric, ipoteză de deterioare, conductivitate de izolare, conductivitatea activă.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE ACCURACY OF DETERMINING OF PARAMETERS AND PLACE OF INSULATION DAMAGE IN THE ELECTRIC NETWORKS OF 6 TO 35 KV

Naraeva R.R. , Khusainov S.N.
Southern Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The present paper is devoted to the research of the method for determining the parameters and plot of insulation damage in the networks of 6 to 35 kV with isolated neutral on the basis of measuring the operating parameters of the network. In the considered three-phase circuit with a symmetric source of EMF and symmetric loading there was a damage of insulation in one of the phases. The calculations are carried out for the transmission line equivalent circuit with a branch line by means of node-potential method. An investigation of the influence of the magnitude of insulation conductivity in the place of damage of different sections of the network upon the accuracy of determining the insulation conductivity is conducted using the data from digital models. The research of this method is performed by advancing hypotheses about the place of damage and by considering the influence of the multiplicity of increasing insulation conductivity of the damaged section and accuracy class of measuring devices.
Keywords: Digital model, hypotheses of damage, total conductivity of insulation, active conductivity.

Введение

Надежность и безопасность эксплуатации распределительных электрических сетей, а также бесперебойность электроснабжения потребителей зависят от состояния электрической изоляции [1, 2].

Как известно, повреждение изоляции воздушных и кабельных линий приводят к однофазным замыканиям на землю, которые представляют большую опасность для самих электроустановок, а также для обслуживающего персонала и посторонних лиц. Для предотвращения подобных ситуаций в распределительных сетях необходимо, чтобы электрическая изоляция находилась в рабочем состоянии. Однако применяемые в сетях 6…35 кВ устройства контроля изоляции не позволяют определить фактический уровень сопротивления изоляции и место его повреждения. Поэтому методам определения параметров изоляции придается большое значение.

Существующие на сегодняшний день методы определения параметров изоляции имеют некоторые особенности, которые в определенной степени влияют на рабочий режим работы сети. Сюда можно отнести методы, требующие полного отключения электроустановки либо установки дополнительного высоковольтного оборудования, либо применения оперативного тока, что отражается на безопасности и надежности электроснабжения. Ряд известных методов лишь фиксирует изменение сопротивления изоляции, не определяя при этом саму его величину.

Среди методов определения параметров изоляции, заслуживают внимание методы, разработанные в Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ), г. Челябинск, Россия, не требующие установки дополнительного оборудования, а, следовательно, не влияющие на рабочий режим работы сети. Эти методы основаны на измерении режимных параметров сети [3, 4], позволяют осуществить периодический контроль изоляции. Для линии без отпайки (т.е. без ответвления) в работе [5] приведена методика определения участка повреждения изоляции. Для обеспечения непрерывного контроля изоляции, позволяющего существенно повысить безопасность эксплуатации электрических сетей, необходимо дальнейшее развитие и исследование методов, основанных на измерении режимных параметров сети.

Постановкой задачи является исследование различных факторов, влияющих на определение величины проводимости изоляции, таких как: кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класс точности измерительных приборов, а также определение участка повреждения изоляции. Исследования проводятся на основе измерения режимных параметров сети с выдвижением гипотез о месте повреждения изоляции.

Определение проводимости изоляции сети и погрешности ее определения

Рассматривается трехфазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, в которой произошло повреждение изоляции в фазе А, поэтому расчеты проводимостей изоляции выполняются для схемы фазы А и сопоставляются с проводимостями изоляции неповрежденной фазы В.

Как и в работах [6, 7, 8] расчеты выполняются по методу узловых потенциалов (МУП) с использованием цифровых моделей (ЦМ) линии с отпайкой для П-образной схемы замещения, записанной в пакете MathCAD:

- одна ЦМ рассчитана в работе [6] для симметричного режима,
- вторая ЦМ рассчитана в данной работе по аналогии с работой [8] для трех случаев ухудшения изоляции в фазе А поочередно для каждого участка сети:

1) на первом участке (1–0) главной линии;

2) на втором участке (0–2) главной линии;
3) на третьем участке (0–3) отпаечной линии, соответственно с величиной ухудшения проводимости изоляции:

$$\underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{b1} + k\,\mathrm{Re}(\underline{Y}_{sb})\frac{1}{2},\quad \underline{Y}_{a2} = \underline{Y}_{b2} + k\,\mathrm{Re}(\underline{Y}_{sb}),\quad \underline{Y}_{a3} = \underline{Y}_{b3} + k\,\mathrm{Re}(\underline{Y}_{sb}),$$

здесь $\underline{Y}_{a1}$, $\underline{Y}_{a2}$, $\underline{Y}_{a3}$ – проводимости изоляции соответственно первого, второго, третьего участков поврежденной фазы А; $\underline{Y}_{b1}$, $\underline{Y}_{b2}$, $\underline{Y}_{b3}$ – проводимости изоляции соответственно первого, второго, третьего участков неповрежденной фазы В; $\underline{Y}_{sb}$ – суммарная проводимость изоляции неповрежденной фазы В ($\underline{Y}_{sb} = \underline{Y}_{b1} + \underline{Y}_{b2} + \underline{Y}_{b3}$);

k – коэффициент кратности увеличения активной проводимости изоляции;

Re – реальная часть комплексной величины $\underline{Y}_{sb}$.

При решении задачи цифрового моделирования, как и в работе [6] заданными считаем следующие параметры неповрежденных линий:

- $\underline{Z}$ – продольное комплексное сопротивление главной линии и $\underline{Z}_3$ – продольное комплексное сопротивление отпаечной линии;
- l – длина главной линии и l_3 – длина отпаечной линии;
- m – коэффициент распределения сопротивления (проводимости) или доля сопротивления (проводимости) первого участка в основной линии.

Главная линия длиной l делится местом присоединения отпайки на две части:

- $\underline{Z}_1 = m\underline{Z}$ – сопротивление первого участка главной линии и $\underline{Z}_2 = (1-m)\underline{Z}$ – сопротивление второго участка главной линии;
- $\underline{Y}_1 = m\underline{Y}$ – проводимость первого участка главной линии и $\underline{Y}_2 = (1-m)\underline{Y}$ – проводимость второго участка главной линии;
- $\underline{Y}_3$ – проводимость отпаечной линии;
- U_0 – напряжение в точке присоединения отпайки;
- $\underline{Z}_{a2}$ – нагрузка в конце главной линии и $\underline{Z}_{a3}$ – нагрузка в конце отпаечной линии.

Данные для цифрового моделирования представлены в пункте 1 приложения.

Расчет цифровых моделей основан на последовательном определении напряжений и токов на участках цепи, начиная с места присоединения отпайки и постепенно продвигаясь к концам и началу линии.

Схема замещения фазы участка сети представлена на рис. 1.

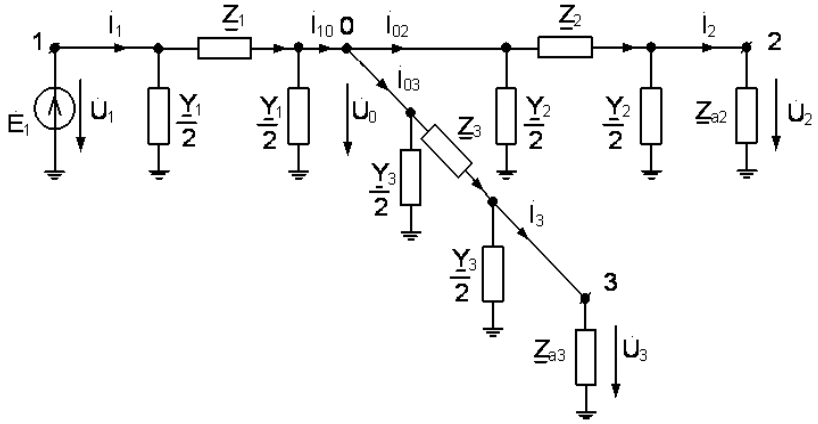


Рис. 1. П-образная схема замещения фазы участка сети

Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений. При моделировании измерений в действительные значения измеряемых величин вносится погрешность в пределах точности измерительных приборов по случайному закону. В результате получаем измеренные значения напряжений, токов и углов сдвига, которые затем подставляем в уравнения, рассмотренные ниже. Для определения диапазона измерения измеряемых и рассчитываемых величин в зависимости от величины погрешностей выполняется 100 циклов измерений и соответствующих им расчетов.

Обычно в сети предусмотрены измерения напряжений, токов и углов сдвига на подстанциях. В нашем случае это подстанции в начале и в конце основной линии и в конце отпаечной линии. В некоторых случаях имеется возможность подключения измерительных приборов в месте присоединения отпайки. Использование этой дополнительной информации позволяет уменьшить погрешности определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли. Соответственно рассмотрим три варианта расчетов цепи с П–образной схемой замещения по МУП (рис. 1):

Вариант 1 – расчет цепи по МУП без дополнительных уравнений.

Записываем уравнения по МУП для схемы (рис. 1), после преобразования этих уравнений, получаем [8]:

$$\left[U_1\left(1+\frac{m\underline{Y}\underline{Z}_1}{2}\right)-\dot{I}_1\underline{Z}_1\right]\left(g+\frac{\underline{Y}+\underline{Y}_3}{2}\right)-U_1\frac{1}{\underline{Z}_1}-U_2e^{j\,\mathrm{Re}(\psi)}\frac{1}{\underline{Z}_2}-U_3e^{j\mathrm{Jm}(\psi)}\frac{1}{\underline{Z}_3}=0; \quad (1)$$

$$\left[U_1\left(1+\frac{m\underline{Y}\underline{Z}_1}{2}\right)-\dot{I}_1\underline{Z}_1\right]\left(\frac{-1}{\underline{Z}_2}\right)+\left[U_2\left(\frac{1}{\underline{Z}_2}+\frac{(1-m)\underline{Y}}{2}\right)+\dot{I}_2^{'}\right]e^{j\,\mathrm{Re}(\psi)}=0; \quad (2)$$

$$\left[U_1\left(1+\frac{m\underline{Y}\underline{Z}_1}{2}\right)-\dot{I}_1\underline{Z}_1\right]\left(\frac{-1}{\underline{Z}_3}\right)+\left[U_3\left(\frac{1}{\underline{Z}_3}+\frac{\underline{Y}_3}{2}\right)+\dot{I}_3^{'}\right]e^{j\mathrm{Jm}(\psi)}=0, \quad (3)$$

здесь:

$\dot{U}_1=U_1$ – фазное напряжение в начале главной линии;

$\dot{U}_2=U_2\cdot e^{j\,\mathrm{Re}(\psi)}$ – фазное напряжение в конце второго участка главной линии;

$\dot{U}_3=U_3\cdot e^{j\mathrm{Jm}(\psi)}$ – фазное напряжение в конце отпаечной линии;

$\psi=\psi_2+j\psi_3$ – комплексная переменная, где ψ_2 – начальная фаза напряжения U_2 в конце второго участка главной линии; ψ_3 – начальная фаза напряжения U_3 в конце отпаечной линии;

так же, как и в работе [6] вводятся обозначения:

$\dot{I}_1=I_1\cdot e^{-j\varphi_1}$ – ток в начале главной линии;

$\dot{I}_2^{'}=I_2\cdot e^{-j\varphi_2}$, где I_2 – ток в конце главной линии;

$\dot{I}_3^{'}=I_3\cdot e^{-j\varphi_3}$, где I_3 – ток в конце отпаечной линии,

здесь углы сдвига фаз между напряжением и током в начале главной линии (φ_1), в конце главной линии (φ_2) и в конце отпаечной линии (φ_3).

Составляем программу определения параметров схемы по уравнениям (1), (2), (3) в пакете MathCAD.

Как показано в [6] характер распределения проводимости изоляции по участкам сети при отсутствии повреждений практически не влияет на определение суммарной

проводимости изоляции, поэтому можно считать, что проводимость распределяется пропорционально длине участков.

При наличии повреждения, особенно при большой величине проводимости в месте повреждения, расчет в предположении равномерности распределения проводимости изоляции дает неверный результат. С другой стороны, по данным измерений режимных параметров мы не можем судить о том, где расположено повреждение. В связи с этим проводим расчет с выдвижением гипотез о месте повреждения. Рассматриваем три гипотезы: гипотеза 1 – повреждение на первом участке; гипотеза 2 – повреждение на втором участке; гипотеза 3 – повреждение на третьем участке, по которым и выполняем перерасчет коэффициента распределения проводимости m, по участкам сети.

В исследованиях по гипотезам поврежденного участка (при определении параметров изоляции) используем:

- суммарную проводимость $\underline{Y}_{sa} = \underline{Y}_{a1} + \underline{Y}_{a2} + \underline{Y}_{a3}$ равную сумме проводимостей первого, второго и третьего участков при ухудшении изоляции в фазе А поочередно на одном из участков сети с *k*-кратным увеличением активной проводимости;
- средние значения из диапазона проводимостей, полученных при определении параметров изоляции исправной симметричной сети по трем вариантам расчетов (варианты 2 и 3 приводятся ниже), определяемые как:

$\underline{Y}_{sb} = \frac{G_{s\max} + G_{s\min}}{2} + j\frac{B_{s\max} + B_{s\min}}{2}$ – средняя суммарная проводимость неповрежденной фазы В;

$\underline{Y} = \frac{G_{\max} + G_{\min}}{2} + j\frac{B_{\max} + B_{\min}}{2}$ – средняя проводимость главной линии неповрежденной фазы В;

$\underline{Y}_3 = \frac{G_{3\max} + G_{3\min}}{2} + j\frac{B_{3\max} + B_{3\min}}{2}$ – средняя проводимость отпаечной линии неповрежденной фазы В;

- величину ухудшения суммарной проводимости изоляции $\Delta\underline{Y} = \underline{Y}_{sa} - \underline{Y}_{sb}$.

Гипотеза 1:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на первом участке (1–0) главной линии. Тогда для второго участка без повреждения величина проводимости

$$\underline{Y}_2 = (1-m)\underline{Y}$$

определяется по заданному для нормального режима коэффициенту распределения проводимости m .

На первом участке проводимость $\underline{Y}_1$ определяем с учетом ухудшения изоляции как

$$\underline{Y}_1 = (\underline{Y} + \underline{\Delta Y}) - \underline{Y}_2 .$$

Перерасчет коэффициента распределения проводимости выполняется по формуле:

$$m = \frac{\underline{Y}_1}{\underline{Y} + \underline{\Delta Y}} .$$

Гипотеза 2:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на втором участке (0–2) главной линии. Тогда для первого участка без повреждения величина проводимости

$$\underline{Y}_1 = m\underline{Y}$$

определяется по заданному для нормального режима коэффициенту распределения проводимости m .

На втором участке проводимость $\underline{Y}_2$ определяем с учетом ухудшения изоляции как

$$\underline{Y}_2 = (\underline{Y} + \underline{\Delta Y}) - \underline{Y}_1.$$

Перерасчет коэффициента распределения проводимости выполняется по формуле:

$$m = 1 - \frac{\underline{Y}_2}{\underline{Y} + \underline{\Delta Y}}.$$

Гипотеза 3:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на третьем участке (0–3) отпаечной линии. Тогда для третьего участка величина проводимости: $\underline{Y}_3 + \underline{\Delta Y}$.

Коэффициент распределения проводимости m сохранился.

С учетом полученных коэффициентов распределения проводимости изоляции по предполагаемым гипотезам повреждения участков сети выполняется расчет П-образной схемы замещения линии с отпайкой по МУП по варианту 1 уравнений цепи.

Алгоритм расчета приведен в пункте 2 приложения (рис.2).

Вариант 2 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для токов. Как и в работе [8] к уравнениям (1), (2), (3) добавляются дополнительные уравнения для токов I_{10}, I_{02}, I_{03} в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left| \dot{I}_1 - \frac{m \cdot \underline{Y}}{2} \left[U_1 \left(2 + \frac{m \underline{Y} \underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \right| - I_{10} = 0; \tag{4}$$

$$\left| \dot{I}_2' + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} \left[U_2 \left(2 + \frac{(1-m) \underline{Y} \underline{Z}_2}{2} \right) + \dot{I}_2' \underline{Z}_2 \right] \right| - I_{02} = 0; \tag{5}$$

$$\left| \dot{I}_3' + \frac{\underline{Y}_3}{2} \left[U_3 \left(2 + \frac{\underline{Y}_3 \underline{Z}_3}{2} \right) + \dot{I}_3' \underline{Z}_3 \right] \right| - I_{03} = 0. \tag{6}$$

здесь параметры, входящие в данные уравнения такие же, как и в варианте 1;

I_{10} – ток в месте присоединения отпайки со стороны первого участка главной линии;

I_{02} – ток в месте присоединения отпайки со стороны второго участка главной линии;

I_{03} – ток в месте присоединения отпайки со стороны третьего участка отпаечной линии.

При повреждении изоляции коэффициент m пересчитывается аналогично по гипотезам 1, 2, 3, приведенным выше.

Вариант 3 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для напряжений. Как и в работе [8] к уравнениям (1), (2), (3) добавляются дополнительные уравнения для напряжения U_0 в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left| U_1 \cdot \left(1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \right| - U_0 = 0; \tag{7}$$

$$\left| U_2 \cdot \left(1 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_2}{2} \right) + \dot{I}_2' \cdot \underline{Z}_2 \right| - U_0 = 0; \tag{8}$$

$$\left| U_3 \cdot \left(1 + \frac{\underline{Y}_3 \cdot \underline{Z}_3}{2} \right) + \dot{I}_3' \cdot \underline{Z}_3 \right| - U_0 = 0. \tag{9}$$

здесь параметры, входящие в данные уравнения такие же, как и в варианте 1;
U_0 – напряжение в месте присоединения отпайки.

При повреждении изоляции коэффициент m пересчитывается аналогично по гипотезам 1, 2, 3, приведенным выше.

Исследования проводятся для относительно небольшого (10-кратного) увеличения проводимости изоляции в линии с отпайкой, позволяющего обнаружить ее ухудшение и определить участок повреждения в цепи с П-образной схемой замещения по МУП.

Все три варианта уравнений с данными цифровых моделей (симметричной и с ухудшением изоляции на первом, втором и третьем участках сети) решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в программе MathCAD.

Алгоритм расчета параметров изоляции и погрешностей их определения для участка сети с П-образной схемой замещения, рассчитанной по МУП по всем трем вариантам уравнений приведен в пункте 2 приложения (рис. 2).

Увеличение активной проводимости на один порядок и сохранение малой величины реактивной проводимости в случае ухудшения изоляции позволяют в допустимых пределах рассчитать погрешности определения активных проводимостей, а для реактивных проводимостей дают большой процент погрешности. Кроме того, повреждение изоляции добавляет активные токи утечки, и поэтому, с учетом изложенного выше, анализу подлежат только активные проводимости.

Результаты расчета погрешности определения проводимости изоляции по участкам повреждения и проводимости изоляции для случая повреждения на первом участке приведены в пункте 3 приложения (табл. 1, 2, 3, 4). Поскольку проводимость 3-го участка мала по сравнению с проводимостью поврежденного участка (табл. 4), то погрешности ее определения превышают саму проводимость. Поэтому эти значения для вариантов 1 (без дополнительных уравнений) и 3 (с дополнительными уравнениями по напряжению) в табл. 1 и 2 не приведены. В табл. 1 – 4 максимальные и минимальные значения величины проводимости изоляции главной линии (G), отпаечной линии (G_3) и суммарной всей сети (G_S) обозначены соответственно $(G_{\max}, G_{\min})$, $(G_{3\max}, G_{3\min})$, $(G_{S\max}, G_{S\min})$.

Результаты, приведенные в табл. 1, 2, 3 показывают, что для правильных гипотез погрешности определения суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка находятся в допустимых пределах и являются меньше, чем для ошибочных гипотез. То есть достаточно точно можно определить проводимость поврежденного участка и суммарную проводимость изоляции сети.

Кроме того, подтверждением правильности гипотез по предполагаемым участкам повреждения являются величины суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка.

Критерием правильной гипотезы считается:

- положительная величина проводимости изоляции;
- увеличение суммарной проводимости и проводимости поврежденного участка на один и тот же порядок (табл. 4).

Действительно, при повреждении на первом участке (табл. 1) по всем трем вариантам уравнений цепи проходит гипотеза 1, по которой предполагается повреждение на участке (1–0) с более точными результатами по 2-му варианту (с дополнительными уравнениями по току).

В случае повреждения на втором участке (табл. 2) правильной является гипотеза 2, с предполагаемым ухудшением изоляции на участке (0–2) и с лучшими результатами по 3-му варианту (с дополнительными уравнениями по напряжению).

При повреждении на третьем участке с большими погрешностями определяются проводимости изоляции не третьего участка как в табл. 4, а проводимости изоляции главной линии, поэтому из табл. 3 исключаются проводимости главной линии.

Для третьего участка повреждения (табл. 3) правильной является гипотеза 3 с предполагаемым ухудшением изоляции на участке (0–3). Однако для 2-го варианта (с дополнительными уравнениями по току) гипотеза 1 с предполагаемым повреждением на участке (1–0) дает малый процент погрешности суммарной проводимости $G_{S\min} = -4,47\,\%$, но сопоставление результатов погрешности определения проводимости изоляции главной линии $G_{\min} = -77\,\%$ и отпаечной (3-го участка) $G_{3\max} = 4,13\,\%$ показывает повреждение на 3-ем участке, что и является критерием неверности гипотезы 1.

Погрешности определения проводимости изоляции сети в зависимости от класса точности измерительных приборов

Для исследования возможностей использования измерительных приборов классов точности 0,1; 0,5 и 1 при моделировании на ЭВМ 100 циклов измерений напряжений, токов и углов сдвига между напряжением и током выполнены расчеты при различных значениях коэффициента кратности увеличения активной проводимости изоляции (*k*), а именно, при 10-кратном, 20-кратном, 30-кратном, 40-кратном, 50-кратном и 60-кратном увеличении проводимости изоляции в месте ее повреждения. В пункте 4 приложения (табл. 5) представлены подтверждения гипотез, полученные по анализу результатов расчета проводимости изоляции при ее ухудшении на первом участке линии с отпайкой при использовании измерительных приборов различных классов точности.

При анализе результатов исследований учитывались следующие критерии:

- критерий правильной гипотезы – проводимость поврежденного участка близка к суммарной проводимости сети;
- критерий неправильной гипотезы – отрицательная величина проводимости изоляции.

При выборе гипотезы поврежденного участка за верную гипотезу принимается та, номер которой соответствует номеру участка повреждения. Если номера не совпадают или несколько гипотез удовлетворяют критериям подтверждения гипотезы, то это означает, что на данном участке повреждения при расчете цепи пользоваться данным вариантом уравнений нельзя, так как этот вариант дает сомнительные результаты, не позволяющие определить участок повреждения и величину его проводимости изоляции. В пункте 5 приложения (табл. 6) приведены погрешности определения суммарной проводимости изоляции при различной кратности ее увеличении на первом участке линии с отпайкой по верной гипотезе 1, предполагающей ухудшение изоляции на первом участке с применением измерительных приборов классов точности 0,1; 0,5; 1.

В результате проведенных исследований для приборов различных классов точности установлена минимальная величина увеличения проводимости изоляции поврежденного участка, позволяющая фиксировать ухудшение изоляции:

- 20-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 0,1;
- 30-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 0,5;
- 60-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 1.

Выводы

Разработан метод определения участка повреждения изоляции в линии с отпайкой и исследовано влияние таких факторов как кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класс точности измерительных приборов на точность определения проводимости изоляции на основе измерения режимных параметров сети.

Установлено, что использование в уравнениях цепи дополнительно измеренных токов в месте присоединения отпайки позволяет уменьшить погрешность определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

Приложение

1. Данные для цифрового моделирования.

- Параметры неповрежденной линии:

$Z_i = 0,306 + j0,421$ Ом/км – сопротивление на единицу длины главной линии; $Z_{3i} = 0,603 + j0,5$ Ом/км – сопротивление на единицу длины отпаечной линии; $Y_i = 0,00001 + j0,00002$ См/км – проводимость на единицу длины линии; $l = 24$ км – длина главной линии; $l_3 = 12$ км – длина отпаечной линии; $m = 0,6$ – коэффициент распределения сопротивления (проводимости); $U_0 = 10/\sqrt{3}$ кВ – фазное напряжение в точке присоединения отпайки; $Z_{a2} = 10/(0,04\sqrt{3})$ Ом, $Z_{a3} = 10/(0,04\sqrt{3})$ Ом – нагрузка соответственно в конце главной и отпаечной линии.

- Кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка: $k = 10$.

Алгоритм расчета параметров изоляции и погрешностей их определения для участка сети с П-образной схемой замещения, рассчитанной по МУП.

Рис. 2. Алгоритм расчета параметров изоляции

2. Погрешности определения проводимости изоляции по участкам повреждения (табл. 1, 2, 3) и проводимости изоляции при повреждении на первом участке (табл. 4).

Таблица 1

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax, %	26,5	1847	-180
Gmin, %	-61,9	8,95	-289
Gsmax, %	4,68	13,9	7,77
Gsmin, %	-2,03	-1310	4,34
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	4,77	-95,6	-97,4
Gmin, %	-3,82	-96,1	-137
G3max, %	138	-82,6	945
G3min, %	-154	-84,4	-10,8
Gsmax, %	2,55	-95,2	-94,4
Gsmin, %	-2,99	-95,7	-114
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax, %	19,0	318	-15,4
Gmin, %	-49,2	198	-631
Gsmax, %	7,79	108	41,5
Gsmin, %	-13,1	46,0	-235

Таблица 2

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на втором участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax, %	1588	-59,4	444
Gmin, %	1564	-102	320
Gsmax, %	-1872	0,420	-48,3
Gsmin, %	-2035	-1,45	-76,2
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	-72,1	1,38	-33,6
Gmin, %	-97,7	-49,9	-103
G3max, %	-25,9	172	1130
G3min, %	-41,0	-111,399	-654,151
Gsmax, %	-70,7	1,568	-52,386
Gsmin, %	-96,0	-49,159	-92,996
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax, %	143	9,46	159
Gmin, %	-35,8	-45,8	-112
Gsmax, %	20,4	17,4	24,8
Gsmin, %	-55,5	-28,1	-87,3

Таблица 3

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на третьем участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
G3max, %	82,3	37,5	60,1
G3min, %	-48,4	-236	-63,7
Gsmax, %	5,39	0,737	2,87
Gsmin, %	-4,30	-12,7	-3,93
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	4,97	-3,32	78,6

Gmin, %	-77,0	-854	-60,9
G3max, %	4,13	52,6	3,53
G3min, %	-1,06	-21,6	-4,91
Gsmax, %	-0,107	38,9	2,29
Gsmin, %	-4,47	-49,6	-0,917
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
G3max, %	53,3	42,9	46,1
G3min, %	-38,6	-65,2	-39,4
Gsmax, %	15,4	17,7	7,21
Gsmin, %	-39,0	-56,5	-21,3

Таблица 4

Проводимости изоляции для случая повреждения на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax	0,004859056	0,0747694704	-0,0030812604
Gmin	0,001461284	0,0041836666	-0,0072425392
G3max	0,0026842204	0,0000403735	0,0113743338
G3min	-0,0009795854	-0,1225406288	0,0073489507
Gsmax	0,0041455044	0,004510612	0,0042676903
Gsmin	0,0038794706	-0,0479096911	0,0041317946
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax	0,0040232722	0,0001687614	0,0001007959
Gmin	0,0036932454	0,0001515308	-0,0014109121
G3max	0,0002861972	0,0000208262	0,0012545261
G3min	-0,0000646915	0,00001867	0,000107045
Gsmax	0,0040609996	0,0001887098	0,0002212639
Gsmin	0,0038414305	0,0001710893	-0,000554867
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax	0,0045705545	0,016039022	0,0032492156
Gmin	0,0019502798	0,0114573486	-0,020405956
G3max	0,0019365197	-0,0049995483	0,0158257856
G3min	-0,0007284265	-0,0079230047	0,0000980228
Gsmax	0,0042684794	0,0082258381	0,0056044664
Gsmin	0,0034423664	0,0057807775	-0,0053535956

3. Подтверждения гипотез при повреждении изоляции на первом участке линии с отпайкой при использовании измерительных приборов различных классов точности.

Таблица 5

Подтверждения гипотез при повреждении на первом участке

Приборы класса точности	Кратность увеличения проводи-мости	Вариант уравне-ний	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
			по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	2	3	4	5	6
0,1	10-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотезы 1; 2	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
	20-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
0,5	20-кратное	1	Гипотезы 1; 3	СР	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	30-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

1	30-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1,2	СР
		3	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
	40-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 2; 3	СР
		3	Гипотезы 1; 2	Гипотезы 1; 2; 3	СР
	50-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1,2	СР
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	60-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

В таблице принято обозначение СР – сомнительный результат.

4. Погрешности определения суммарной проводимости изоляции при различной кратности ее увеличении на первом участке линии с отпайкой по верной гипотезе 1, предполагающей ухудшение изоляции на первом участке с применением измерительных приборов разных классов точности.

Таблица 6

Погрешности определения суммарной проводимости изоляции
при ухудшении изоляции на первом участке

Приборы класса точности	Кратность увеличения проводимости изоляции	Суммарная проводимость	Вариант уравнений		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
0,1	10-кратное	Gsmax, %	4,68	2,55	7,79
		Gsmin, %	–2,03	–2,99	–13,1
	20-кратное	Gsmax, %	1,76	0,515	2,09
		Gsmin, %	–2,23	–0,628	–7,34
0,5	20-кратное	Gsmax, %	5,1	8,16	12,9
		Gsmin, %	–16,2	–5,96	–37,6
	30-кратное	Gsmax, %	3,34	4,99	8,6
		Gsmin, %	–9,57	–2,66	20,7
1	30-кратное	Gsmax, %	5,2	8,9	19,6
		Gsmin, %	–26,4	–8,1	–45,0
	40-кратное	Gsmax, %	3,96	5,8	28,2
		Gsmin, %	–18,6	–6,1	-55,9
	50-кратное	Gsmax, %	3,2	–9,95	–1,87
		Gsmin, %	–14,4	–29,3	–48,6
	60-кратное	Gsmax, %	2,8	4,3	15,8
		Gsmin, %	–11,8	–4,2	–30,1

Литература

[1] Arora, R. “High Voltage and Electrical Insulation Engineering” / R. Arora, W. Mosch // IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-IEEE Press, 1 edition, August 2011. – 394 p.

[2] James, R.E. “Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment” / R.E. James, Q. Su // IET Power and Energy, Series: Iet Power and Energy, January 2007. – 288 p.

[3] Хусаинов, Ш.Н. Определение параметров изоляции для линии с отпайкой по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров,

Н.А. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(04). – С. 55–59.

[4] Хусаинов, Ш.Н. Определение поврежденного участка сети, содержащего основную и отпаечную линии, по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮурГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 16–19.

[5] Хусаинова, Н.А. Метод диагностики состояния изоляции электрических распределительных сетей по результатам измерения режимных параметров / Н.А. Хусаинова, Ю.В. Косоротова, А.И. Сидоров // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Сборник материалов второй Всероссийской научно-практической конференции. – Челябинск: Изд-во ЗАО «Челябинская межрайонная типография». 2003. – С. 81–82.

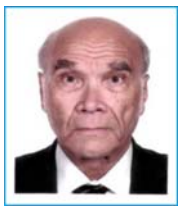
[6] Хусаинов, Ш.Н. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып.8. – № 20(92). – С.32–37.

[7] Нараева, Р.Р. Анализ погрешности результатов расчета параметров изоляции, в зависимости от выбранных схем замещения линии электропередачи / Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: сб. науч. тр. – Москва: РАН, 2007. – С. 364–374.

[8] Хусаинов, Ш.Н. Исследование влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения на точность ее определения косвенным методом / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 9–15.

Сведения об авторах

Нараева Рузалия Раисовна, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук, область научных интересов – онлайн-мониторинг состояния электрической изоляции в сетях 6…35 кВ.
Контактный адрес: Россия, г Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, e-mail: nar.ru@mail.ru



Хусаинов Шамиль Нагимович, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, область научных интересов – теория электрических схем с многополюсными элементами.
Контактный адрес: Россия, г Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, e-mail: shanh@mail.susu.ac.ru

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РЕЖИМА ПЕРЕДАЧИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Пацюк В.И., Берзан В.П., Анисимов В.К., Кабак С.С., Посторонка С.А.
Институт Энергетики АН Молдовы

Аннотация. Рассмотрена проблема передачи максимальной мощности в нагрузку длинной линии при изменении режима работы линии от холостого хода (ХХ) до короткого замыкания (КЗ). При этом длина линии изменяется от нуля до ее волновой длины. В качестве метода исследования использован метод комплексных амплитуд (МКА). В качестве независимых переменных рассмотрены длина линии и ее нагрузка (диапазон изменения нагрузки линии в относительных единицах от минус единица до плюс единица). Установлено, что для активной нагрузки наблюдаются максимумы функций мощности на входе линии, передаваемой активной мощности, коэффициента полезного действия линии, а также коэффициента мощности на входе линии и коэффициента мощности нагрузки. Введено понятие критического сопротивления нагрузки линии, которое соответствует максимальному значению одного из рассмотренных параметров, которое имеет разные значения для мощности на входе линии и передаваемой мощности - эффект «разбегания» значении критических сопротивлений. Компенсация параметров нагрузки позволяет увеличить передаваемую мощность только в линиях с потерями при их длинах меньше ¼ длины электромагнитной волны. У неискажающих линий такого эффекта не наблюдается вообще. В работе приведены обобщенные данные о режимах передачи максимальной мощности линии различной длины в нагрузку, которая изменяется от ХХ до КЗ. Эти данные могут быть использованы для предварительного анализа эффективности работы электрических линий при переменной нагрузки.

Ключевые слова: Электрическая линия, передаваемая мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, метод комплексных амплитуд.

UNELE PARTICULARITĂȚI ALE TRANSMISIEI PRIN LINIILE LUNGI DE CURENT ALTERNATIV A PUTERII ACTIVE

Pațiuc V., Berzan V., Anisimov V., Cabac S., Postoronca S.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În lucrare se examinează problema transferului maxim de putere sarcinei prin linia lungă. Sarcina liniei se modifică de la regimul de mers în gol (MG) până la regimul de scurtcircuit (SC). Lungimea liniei se variază de la zero până la lungimea egală cu lungimea fizică a undei electromagnetice. Ca metodă de cercetare s-a utilizat metoda amplitudinilor complexe (MAC). În calitate de variabile independente s-au examinat lungimea liniei şi sarcina ei, care în sistemul de unități relative s-a modificat în banda de la minus unitate până la plus unitate. S-a detrminat că, pentru sarcina cu caracter activ puterea activă intrare şi puterea ieşire din linie, precum şi funcțiile ce caracterizează evoluțiile randamentului, factorului de putere coeficiențelor o maxima sarcină rezistivă observat funcții de putere a linieш (intrare) şi a sarcinii au valori extreme pentru diferite valori a parametrului z (sarcinii). Pentru aceste puncte s-a introdus noțiunea de valoare critică a sarcinii. S-a depistat efectul de "recesiune" a valorilor rezistenței critice pentru puterea activă intrare şi puterea ieşire din linie, ceea ce nu este depistat pentru celelalte funcții examinate – randament şi factor de putere. Compensarea puterii reactive a sarcinii poate contribui la creşterea puterii transmise doar pentru liniile cu lungimea mai mici ca lungimea de ¼ a undei electromagnitice. În linii non-distorsionare astfel de efect nu se observă. În lucrarea sunt prezintate informații generalizate privind transmisia puterii active maximale prin liniile de diferită lungime la varierea sarcinii în banda de la regimul de MG până la regimul de SC al liniei. Aceste date pot fi utilizate pentru analiza preliminară a eficienței liniilor electrice la sarcină variabilă.

Cuvinte-cheie: Linie electrică, putere transmisă, randament, factor de putere, metoda amplitudinilor complexe.

ABOUT SOME FEATURES OF TRANSMISSION MODE FOR ACTIVE POWER OF ELECTRICAL LINE

Paţiuc V., Berzan V., Anisimov V., Cabac S., Postoronca S.
Institute of Power Engeneering of the ASM

Abstract. This paperwork examines the problem of maximum power transfer to the load of a long line mode change from idle line (XX) to short-circuit (SC). Load line changes from idle mode (IM) to its short-circuit (SC). The line length varies from zero up to a length equal to the physical length of the electromagnetic wave. As a method of research it is used the method of the complex amplitudes (MCA). As independent variables were examined her load line length and that the system per unit change in the band plus minus unit to unit , so $-1 < z < 1$. It enteritis that for the active character load of the active power input and power output of the line, so functions $P_0 = F(z)$, $P_1 = F(z)$ and functions that characterize developments efficiency $\eta = F(z)$, power factor at the input line and the load power factor when the variable z. For these points to the notion of critical value of the load . It founds the effect of " recession " critical resistance values and functions $P_0 = F(z)$ şi $P_1 = F(z)$, which is not found for the other functions considered - efficiency and power factor. Load reactive power compensation can help to increase power output only for lines with length smaller than ¼ wave length electromagnitice wave. In non-distortional lines, such effect is not observed. The paper work represents the general data transmission mode the maximum power lines of different lengths to the load, which varies from idle mode (IM) to short-circuit (SC) regime. These data can be used for preliminary analysis of the efficiency of the electrical lines at variable load.

Keywords: Electric power line, transmitted power, efficiency, power factor, method of complex amplitudes.

1. Введение

Электрические линии являются одним из важнейших функциональных и конструктивных элементов современных электроэнергетических систем, которые оказывают влияние на эффективность процесса передачи и распределения электрической энергии конечным потребителям. С момента становления электроэнергетики как отрасли ведутся исследования и внедряются мероприятия направленные на снижение потерь энергии в электрических сетях и повышения их коэффициента полезного действия. Выводы, сделанные Эдисоном о целесообразности передачи электрической энергии потребителям на высоком напряжении, определили направление развития электрических сетей и электроэнергетики на многие годы вперед [1].

Рост значений передаваемых мощностей, в том числе на большие расстояния обозначили в качестве приоритетных задач снижение потерь энергии при передаче и распределения электрической энергии и обеспечение режима передачи максимальной мощности нагрузки [2-4]. Исследования показали, что снижение потерь энергии при передаче электрической энергии и обеспечение в этом случае высоких энергетических показателей является комплексной задачей[5]. Для линейных цепей постоянного тока режим передачи максимальной мощности из линии нагрузке определяется условием Ленца - Бота [6].

Электрические линии могут быть оснащены различными устройствами продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. Эти устройства представляются в расчетных схемах как электрические цепи с сосредоточенными параметрами, а линии в данном случае представляют собой неоднородные электрические цепи с распределенными параметрами.

Поскольку, нагрузка и сами параметры реальной линии могут принимать очень широкий диапазон значений, следует, что анализ процессов передачи энергии по электрической линии имеет достаточно сложный характер, а, получаемые решения являются в большинстве случаев частными в рамках принятых ограничений и не

отражают весь спектр возможных решений, характеризующие процессы передачи мощности нагрузке.

В данной работе рассматривается задача получения обобщенного решения для случая передачи максимальной мощности нагрузки при изменении режима линии от холостого хода до короткого замыкания и разнообразном наборе значений параметров самой линии. Рассматривается режим питания нагрузки и линии от источника синусоидального напряжения.

2. Постановка задачи

Пусть имеется длинная линия с потерями, которая подключена к питающим шинам бесконечной мощности переменного синусоидального тока частотой f. Линия питает нагрузку, которая может иметь и комплексный характер. В линии может быть включена установка для продольной компенсации реактивной мощности нагрузки с целью повышения передаваемой активной мощности линии. Полагаем, что токи и напряжения в линии длинной l удовлетворяют телеграфным уравнениям:

$$L\frac{\partial i}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}+Ri=0;\ C\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial i}{\partial x}+Gu=0\,, \tag{1}$$

при следующих граничных условиях:

$$u(0,t)=U_0\exp(j\omega t)\,;\ u(l,t)=R_S i(l,t)\,. \tag{2}$$

Необходимо определить условия передачи максимальной мощности в нагрузку линии и зависимости основных энергетических параметров, характеризующие установившийся режим работы электрической цепи с распределенными и сосредоточенными параметрами, от длины линии при изменении ее нагрузки в широких пределах. От режима холостого хода до режима короткого замыкания.

3. Работа линии с потерями на активную нагрузку

Для линии постоянного тока с ненулевым погонным сопротивлением ($R>0$) и идеальной изоляцией ($G = 0$) максимальная потребляемая мощность достигается при выполнении условия $R_S = Rl$, т.е. когда активное сопротивление нагрузки равно полному сопротивлению всей линии. В этом случае КПД линии не зависит от ее длины и равен 0.5. Для случая переменного напряжения это условие не выполняется даже для сравнительно коротких линий: $l < \lambda/16$ [5]. Разомкнутые формулы для точного определения средних установившихся значений генерируемой (P_0) и передаваемой (P_1) мощности и КПД (η) при работе линии переменного напряжения на чисто активную нагрузку с сопротивлением $R_S \geq 0$ имеют вид [5]:

$$P_1=\frac{1}{2}\mathrm{Re}(U_1 I_1^*)=\frac{1}{2}\left|I_1\right|^2\mathrm{Re}(Z_S)=\frac{R_S}{2}\left|I_1\right|^2=\frac{U_0^2 R_S}{2\left|R_S\mathrm{ch}\delta l+Z_0\mathrm{sh}\delta l\right|^2}\,;$$

$$P_0 = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(U_0 I_0^*) = \frac{U_0}{2}\mathrm{Re}(I_0) = \frac{U_0}{2}\mathrm{Re}\left(\frac{1}{Z_{BX}}\right) = \frac{U_0^2\,\mathrm{Re}\left(Z_{BX}\right)}{2\left|Z_{BX}\right|^2}; \tag{3}$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{R_S\left|Z_{BX}\right|^2}{\left|R_S\mathrm{ch}\delta l + Z_0\mathrm{sh}\delta l\right|^2\,\mathrm{Re}\left(Z_{BX}\right)};\ Z_{BX} = Z_0\frac{R_S\mathrm{ch}\delta l + Z_0\mathrm{sh}\delta l}{R_S\mathrm{sh}\delta l + Z_0\mathrm{ch}\delta l}.$$

Если исследовать на экстремум указанные функции, то для сопротивления R_S получим следующие выражения:

A) $\max\limits_{R_S} P_0$ достигается при R_{0k}.

Значение R_{0k} определяется через вещественные корни $R_{0k}^{\pm}$ квадратного уравнения

$$R_S^2\,\mathrm{Re}\left(\mathrm{ch}^2\delta l\right) + R_S\,\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}2\delta l\right) + \mathrm{Re}\left(Z_0^2\mathrm{sh}^2\delta l\right) = 0:$$

$$R_{0k}^{\pm} = \frac{-\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta l\right) \pm \mathrm{Im}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right)}{\mathrm{Re}\left(\mathrm{ch}^2\delta l\right)}. \tag{4}$$

Эти корни могут быть либо разных знаков, либо оба отрицательны, поэтому значение R_{0k} определяется по формуле

$$R_{0k} = \begin{cases} R_{0k}^+, & \text{если } R_{0k}^+ > 0 \\ R_{0k}^-, & \text{если } R_{0k}^- > 0 \\ 0, & \text{если } \mathrm{Re}\left(\mathrm{ch}^2\delta l\right) > 0 \\ \infty, & \text{если } \mathrm{Re}\left(\mathrm{ch}^2\delta l\right) < 0 \end{cases}. \tag{5}$$

B) $\max\limits_{R_S} P_1$ достигается при $R_{1k} = \left|Z_0\mathrm{th}\delta l\right|$.

C) Максимальное значение КПД $\max\limits_{R_S}\eta$ достигается при R_η.

Значение параметра R_η определяется из формул:

$$R_\eta = \left|Z_0\right|\sqrt{\frac{\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right)}{\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta^* l\mathrm{ch}\delta l\right)}},\ \text{если}\ \mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right)\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta^* l\mathrm{ch}\delta l\right) \ge 0. \tag{6}$$

Если же $\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right)\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta^* l\mathrm{ch}\delta l\right) < 0$, то $R_\eta = 0$ при $\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right) < 0$ и $R_\eta = \infty$ при $\mathrm{Re}\left(Z_0\mathrm{sh}\delta l\mathrm{ch}\delta^* l\right) > 0$.

Для получения обобщенных характеристик об изменении исследуемых параметров целесообразно выполнить расчеты в системе относительных единиц [1]:

$$u = \frac{u^0}{U^0};\ i = \frac{i^0 Z_B^0)}{U^0};\ t = \frac{t^0}{\Delta^0};\ x = \frac{x^0}{\lambda^0};$$
$$R = \frac{R^0 \lambda^0}{Z_B^0};\ R_S = \frac{R_S}{Z_B^0};\ G = G^0 \lambda^0 Z_B^0; \qquad (7)$$
$$Z_B^0 = \sqrt{\frac{L^0}{C^0}};\ a^0 = \frac{1}{\sqrt{L^0 C^0}};\ z = \frac{R_S - Z_B^0}{R_S + Z_B^0},$$

где U-значение номинального напряжения цепи; Z_B^0-волновое сопротивление идеальной линии; R_S- сопротивление нагрузки; $\lambda^0 = a^0 / f^0$- длина волны на частоте источника питания f^0; Δ^0- время пробега волны в линии и $\Delta^0 = \lambda^0 / a^0$; a^0- скорость распространения электромагнитных возмущений в линии; z - значение сопротивления нагрузки линии в системе безразмерных единиц.

Значок градус обозначает, что указанные физические величины имеют размерность.

3.1. Результаты расчета характеристик передачи мощности в активную нагрузку линии

На рис. 1 представлено изменение генерируемой P_0 и передаваемой мощности P_1, КПД и коэффициента мощности (КМ) источника и приемника (на рис.1 кривые 1–5) в зависимости от параметра z при l = 0.0516λ, где λ- волновая длина линии в системе относительных единиц; R = 0.48(a); 4.8(b); G = R/5; $Z_S = R_S$. Значение безразмерного параметра z определяется по формуле $z = (R_S - Z_B)/(R_S + Z_B)$, причем безразмерный параметр z принимает значение $z = -1$ при коротком замыкании и $z = 1$ при холостом ходе, R_S - активное сопротивление нагрузки линии, $Z_B = \sqrt{L_0 / C_0}$ - волновое сопротивление идеальной линии с погонными параметрами L_0 и C_0.

На рис.2. представлены кривые изменения генерируемой P_0 и передаваемой P_1 мощностей, КПД и КМ источника и приемника от параметра z при $Z_S = R_S - j/(\omega C_S)$; C_S =1 (17.57мкФ). Здесь и в дальнейшем $R = 0.48$, G=R/5. Продольная компенсация параметров нагрузки для этой длины линии увеличивает максимальную передаваемую мощность, но уменьшает КПД и КМ ($\cos\varphi$).

На рис. 3 показаны кривые изменения генерируемой P_0 и передаваемой P_1 мощностей, КПД и критического сопротивления z_{1k} от длины линии (кривые 1–4). Увеличению (уменьшению) передаваемой мощности по мере изменения длины линии всегда сопутствует уменьшение (увеличение) КПД. Для четвертьволновой линии максимум мощности имеет место в режиме, близком к ХХ (R_S = 13.93 Z_B), а для полуволновой линии в режиме, близком к КЗ (R_S = 0.14 Z_B).

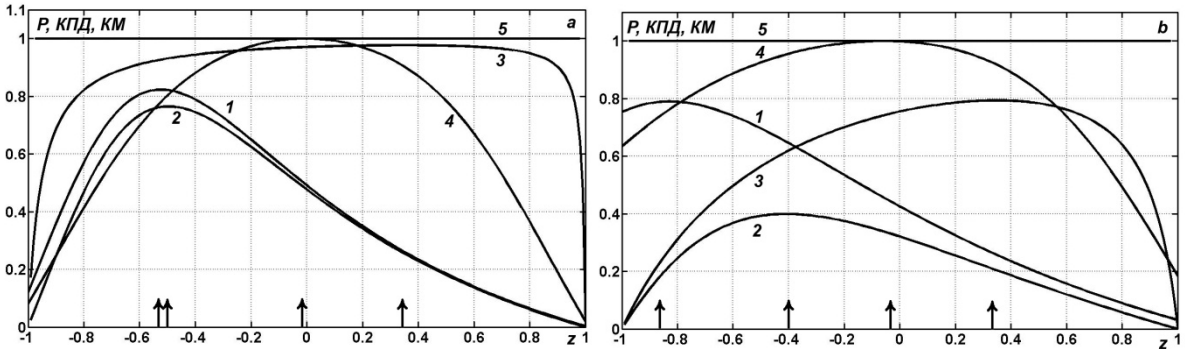


Рис. 1. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от сопротивления нагрузки R_S при $l = 0.0516$; $R = 0.48$(***a***); 4.8(***b***); $G = R/5$; $Z_S = R_S$

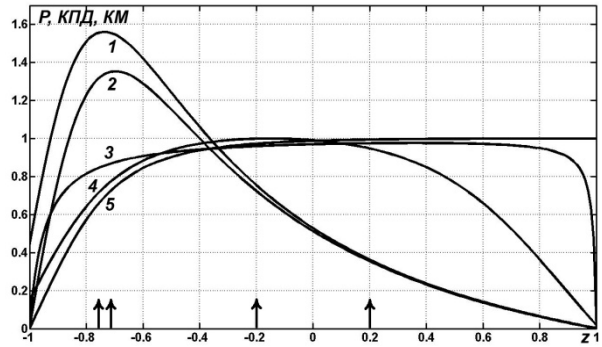


Рис. 2. Зависимость генерируемой P_0 (кривая 1) передаваемой мощности P_1 (2), КПД (3) и КМ источника (4) и приемника (5) от сопротивления нагрузки R_S при $l = 0.0516$; $R = 0.48$; $G = R/5$; $Z_S = R_S - j/(\omega C_S)$; $C_S = 1$

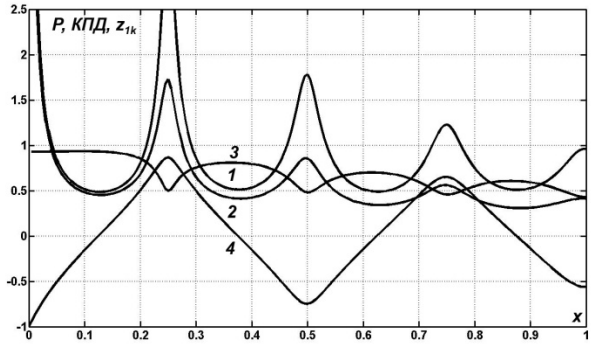


Рис. 3. Зависимость от длины линии x генерируемой P_0 (1), максимальной передаваемой P_1 (2) мощности, КПД (3) и критического сопротивления z_{1k} (4) при $R = 0.48$; $G = R/5$

Характеристики, представленные на рис.1 наглядно иллюстрируют тот факт, что максимумы всех исследуемых здесь функций достигаются при различных значениях сопротивления нагрузки R_S. С увеличением потерь в линии наблюдается «разбегание» критических сопротивлений для генерируемой и передаваемой мощности, тогда как точки максимума для КПД и КМ остаются практически неподвижными. Таким образом, при вариации параметра R_S для любого отрезка длины линии можно получить полное представление об особенностях передачи мощности по линии, что в итоге, позволяет выбрать оптимальный режим линии исходя из тех или иных критериев, а также поставленных целей исследования.

4. Работа линии с потерями на комплексную нагрузку

Чисто активный характер нагрузки линии следует рассматривать как частный случай. Чаще всего нагрузка имеет комплексный характер, а потребленная реактивная мощность нагружает линию и влияет на ее энергетические параметры: потери энергии, коэффициенте полезного действия и на значение коэффициента мощности.

Уменьшение потоков реактивной мощности по линии можно обеспечить за счет локальной компенсации реактивной мощности нагрузки, что является в общем известным и широко применяемым техническим решением.

Большинство потребителей электроэнергии представляют собой электромагнитные устройства (электрические машины переменного тока, трансформаторы, оборудование для дуговой сварки, различного рода преобразовательные устройства на основе элементов силовой электроники и т.п.). Следствием этого, коэффициент мощности cosφ и КПД имеют более низкие значения, чем в случае передачи номинальной активной мощности по линии. При снижении доли активной мощности нагрузки в полной мощности $S = \sqrt{P_S^2 + Q_S^2}$ линия нагружается реактивной мощностью, что и обуславливает относительное увеличение потерь в линии. В разделе 3.1 показано, что энергетические характеристики линии переменного тока не так однозначны даже для случая, когда нагрузка является чисто активной. Величины переданной мощности, КПД и коэффициента мощности зависят от параметров самой линии, в том числе от ее волновой длины.

Исходя из этого, сформулируем следующую задачу. Пусть мы имеем длинную линию с распределенными параметрами, которая питает чисто активную нагрузку R_S. Необходимо оценить возможность одновременного увеличения передаваемой мощности и КПД линии, а также определить условия достижения этих режимов в линии. На рис.4 представлена эквивалентная схема длинной линии переменного тока для случая последовательного включения с нагрузкой R_S реактивного сопротивления X_S.

Рис. 4. Линия переменного напряжения с активной R_S и реактивной X_S нагрузкой на приемном конце

Если нагрузка на конце линии имеет активную и реактивную составляющие (см. рис. 4), тогда уравнения установившегося режима в гиперболических функциях (УУР) для данной цепи принимают вид [5]:

$$Z_S = R_S + j\left(\omega L_S - \frac{1}{\omega C_S}\right) = R_S + jX_S;$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}};\ \delta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)};$$

$$U_0 = Z_{BX} I_0;\quad U_1 = Z_S I_1;\ Z_{BX} = Z_0 \frac{Z_S + Z_0 \mathrm{th}(\delta l)}{Z_0 + Z_S \mathrm{th}(\delta l)}; \tag{8}$$

$$U_1 = U_0 \mathrm{ch}(\delta l) - Z_0 I_0 \mathrm{sh}(\delta l);$$

$$I_1 = -\frac{U_0}{Z_0}\mathrm{sh}(\delta l) + I_0 \mathrm{ch}(\delta l) = \frac{U_0}{Z_0 \mathrm{sh}(\delta l) + Z_S \mathrm{ch}(\delta l)};$$

$$S = UI^* = |U||I|\cos\varphi + j|U||I|\sin\varphi.$$

Активную мощность нагрузки можно записать в виде

$$P_1 = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(U_1 I_1^*\right) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(Z_S I_1 I_1^*\right) = \frac{1}{2}|I_1|^2\ \mathrm{Re}\left(Z_S\right) = \frac{R_S}{2}|I_1|^2. \tag{9}$$

Для определения максимального значения P_1 по параметрам нагрузки X_S и R_S требуется решить систему двух уравнений

$$\frac{\partial P_1(X_S, R_S)}{\partial X_S} = 0,\quad \frac{\partial P_1(X_S, R_S)}{\partial R_S} = 0,$$

которые после дифференцирования принимают вид

$$R_S |I_1| \frac{\partial |I_1|}{\partial X_S} = 0,\quad |I_1|\left(|I_1| + 2R_S \frac{\partial |I_1|}{\partial R_S}\right) = 0. \tag{10}$$

Из (10) следует, что для решения поставленной задачи необходимо решить систему уравнений

$$\frac{\partial |I_1|}{\partial X_S} = 0,\quad |I_1| + 2R_S \frac{\partial |I_1|}{\partial R_S} = 0. \tag{11}$$

Рассмотрим первое уравнения (11). Проведя дифференцирование модуля $|I_1|$, получаем уравнение, из которого определяем оптимальное значение X_S:

$$X_{S,k} = \frac{\mathrm{Im}\left(Z_0^* \mathrm{sh}(\delta^* l)\mathrm{ch}(\delta l)\right)}{\left|\mathrm{ch}(\delta l)\right|^2}. \tag{12}$$

Решая второе уравнение из (11) получаем явное выражение для оптимального значения R_S в зависимости от значения параметра X_S:

$$R_S^2 = X_S^2 + \left|Z_0 \text{th}(\delta l)\right|^2 - \frac{2X_S}{\left|\text{ch}(\delta l)\right|^2} \text{Im}\left(Z_0^* \text{sh}(\delta^* l)\text{ch}(\delta l)\right)$$

или

$$R_{S,k} = \sqrt{\left|Z_0 \text{th}(\delta l)\right|^2 - X_{S,k}^2}\ . \tag{13}$$

Вычисление значений матрицы вторых производных при $R_S = R_{S,k}$ и $X_S = X_{S,k}$ приводит к отрицательно определенной матрице, что гарантирует существование в этой точке максимального значения мощности P_1. Далее, определим значения параметров нагрузки X_S и R_S, при которых КПД ($\eta = P_1 / P_0$) достигает максимального значения. Поскольку для мощности нагрузки и для мощности на входе линии можно записать следующие уравнения

$$P_1 = R_S \left|I_1\right|^2 \text{ и } P_0 = U_0 \,\text{Re}(I_0) = U_0 (I_0 + I_0^*)/2\ ,$$

то значение коэффициента полезного действия рассматриваемой электрической цепи можно вычислить по формуле

$$\eta = \frac{R_S Z_0 Z_0^*}{\text{Re}\left[Z_0^* (Z_0 \text{ch}\delta l + Z_S \text{sh}\delta l)(Z_S^* \text{ch}\delta^* l + Z_0^* \text{sh}\delta^* l)\right]}\ . \tag{14}$$

Для определения максимального значения КПД требуется решить систему следующих уравнений

$$\frac{\partial \eta(X_S, R_S)}{\partial X_S} = 0, \quad \frac{\partial \eta(X_S, R_S)}{\partial R_S} = 0\ . \tag{15}$$

Рассмотрим первое уравнения (15). Проведя дифференцирование и упрощение, получаем уравнение, из которого определяем оптимальное значение X_S:

$$X_{S,\eta} = \frac{\text{Im}\left[Z_0^* \left(Z_0^* \left|\text{sh}(\delta l)\right|^2 - Z_0 \left|\text{ch}(\delta l)\right|^2\right)\right]}{2\,\text{Re}\left(Z_0^* \text{sh}(\delta l)\text{ch}(\delta^* l)\right)}\ . \tag{16}$$

Решая второе уравнение из (15) получаем явное выражение для оптимального значения R_S в зависимости от значения параметра X_S:

$$R_S^2 = X_S^2 + \frac{X_S \,\text{Im}(Z_0^2)\left|\text{sh}(\delta l)\right|^2 + \left|Z_0\right|^2 \text{Re}\left(Z_0^* \text{sh}(\delta^* l)\text{ch}(\delta l)\right)}{\text{Re}\left(Z_0^* \text{sh}(\delta l)\text{ch}(\delta^* l)\right)}\ . \tag{17}$$

Вычисление значений матрицы вторых производных при $R_S = R_{S,\eta}$ и $X_S = X_{S,\eta}$ приводит к отрицательно определенной матрице, что гарантирует существование в этой точке максимального значения КПД (η).

4.1. Результаты расчета характеристик передачи мощности в нагрузку при ее комплексном характере

В качестве активной составляющей комплексной нагрузки линии целесообразно выбрать величину R_S (значение активной нагрузки линии из предыдущего рассмотрения), т.е. выбрать активную нагрузку линии равное ее волновому сопротивлению $R_S = Z_B$, поскольку именно при таком сопротивлении КПД достигает максимального значения при изменении величины R_S.

На рис. 5 представлена зависимость КПД от длины линии при ее потерях R = 0.48, G = R/5(a); R = 4.8, G = 0(b). Кривая 1 получена при нулевом реактивном сопротивлении нагрузки X_S = 0, а кривая 2 соответствует такому $X_S = X_{S,\eta}$, при котором КПД максимален для заданной длины линии.

Из графиков видно, что сколь нибудь заметного повышения КПД удается достичь с помощью продольной компенсации параметров нагрузки лишь на участке 0 < x < 0.25 линии при достаточно больших значениях погонного сопротивления R = 4.8 и отсутствии утечки тока через изоляцию линии G = 0 (см. рис. 6*b*). Если нагрузка подключена к неискажающей линии, то обе кривые совпадают и никакого улучшения КПД получить нельзя.

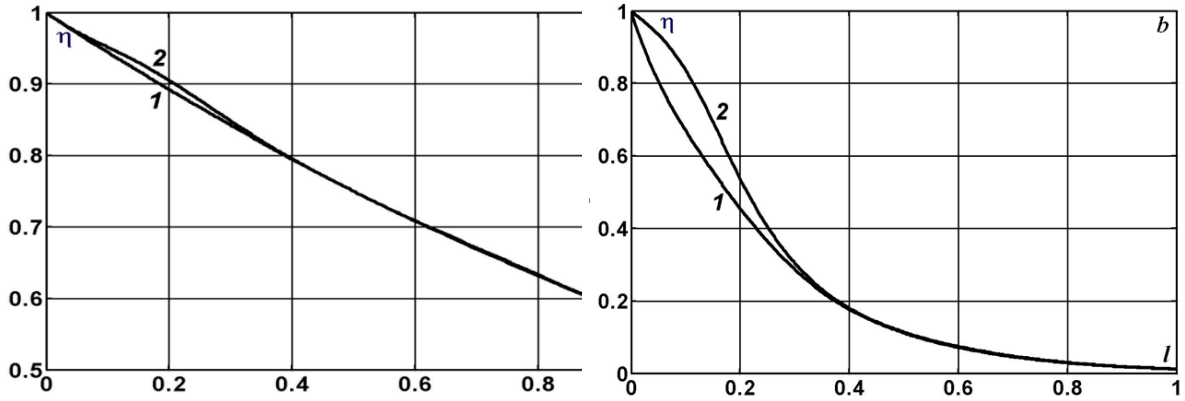


Рис. 5. Зависимость η (X_S = 0) (1) и η ($X_S = X_{S,\eta}$) (2) от длины линии при $R_S = Z_B$ и R = 0.48, G = R/5(a); R = 4.8, G = 0(b)

Зависимости на рис. 6 показывают, что оптимальное (критическое) сопротивление $X_{S,\eta}$ изменяется в довольно широких пределах, но оно всегда положительно, а, следовательно, носит индуктивный характер. При небольших потерях (R = 22 мОм/км) сопротивление компенсирующего реактивного элемента является нулевым для полуволновой линии (см. рис. 7a,b).

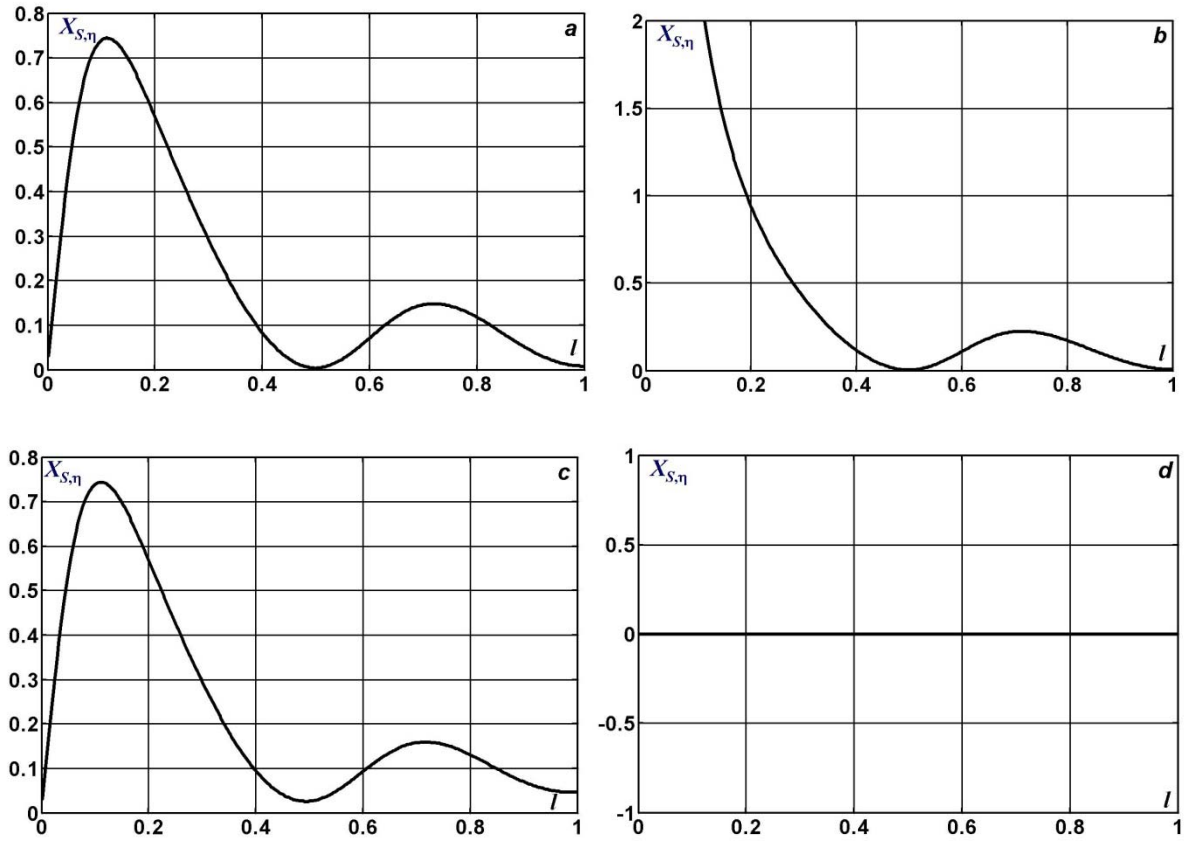


Рис. 6. Зависимость $X_{S,\eta}$ от длины линии при $R_S = Z_B$ и $R = 0.48$, $G = R/5(a)$; $R = 0.48$, $G = 0(b)$; $R = 1.205$, $G = R/5(c)$; $R = G = 1.205(d)$

Исследуем особенности изменения значения передаваемая мощность P_1 при подключении последовательно к чисто активной нагрузке R_S реактивного сопротивления $X_S = X_{S,\eta}$. На рис. 7 показаны зависимости величины P_1 от длины линии. На этих характеристиках имеются участки линии в пределах которых абсорбируемая активная мощность комплексной нагрузкой превышает значение характерное для согласованной с линией активной нагрузки. Длина линии для этого режима оказывается равной примерно 0,3λ (волновой длины линии). Для этой физической длины линии функция P_1 получает максимальное возможное значение для рассмотренных условий работы линии.

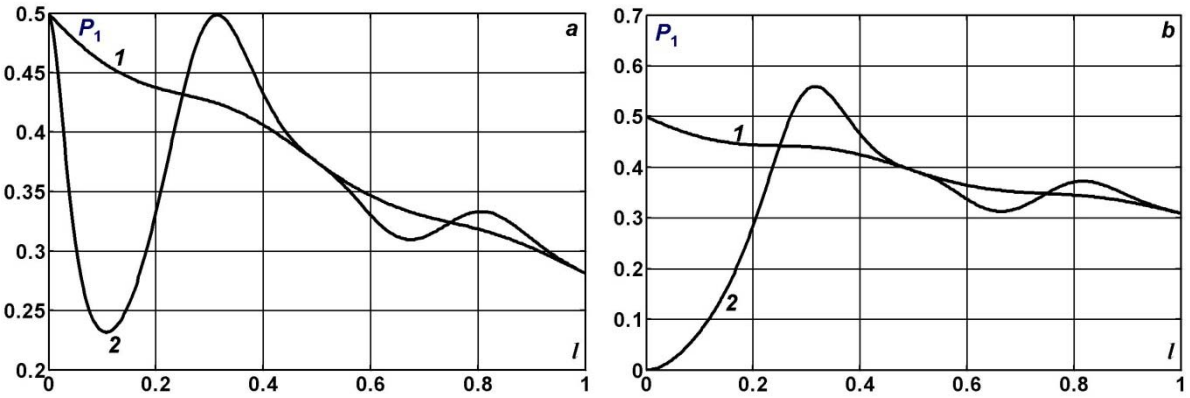


Рис.7. Зависимость P_1 ($X_S = 0$) (1) и P_1 ($X_S = X_{S,ĵ}$) (2) от длины линии при $R_S = Z_B$ и $R = 0.48$, G = R/5(a); R = 0.48, G = 0(b)

Определим сопротивление $X_S = X_{S,k}$, при котором передаваемая мощность максимальна и выясним, как при этом изменится КПД. На рис. 8 показана зависимость максимальной передаваемой мощности от длины линии. Обращает на себя внимание тот факт, что в целом мощность удается повысить даже для неискажающей линии, за исключением тех случаев, когда нагрузка подключена к приемному концу четверть- или полуволновой линий. Зависимость $X_{S,k}$ от длины линии является здесь знакопеременной функцией. Емкостной характер реактивного сопротивления ($X_{S,k} < 0$) сменяется индуктивным ($X_{S,k} > 0$) периодом равным 0,25λ волновой длины линии.

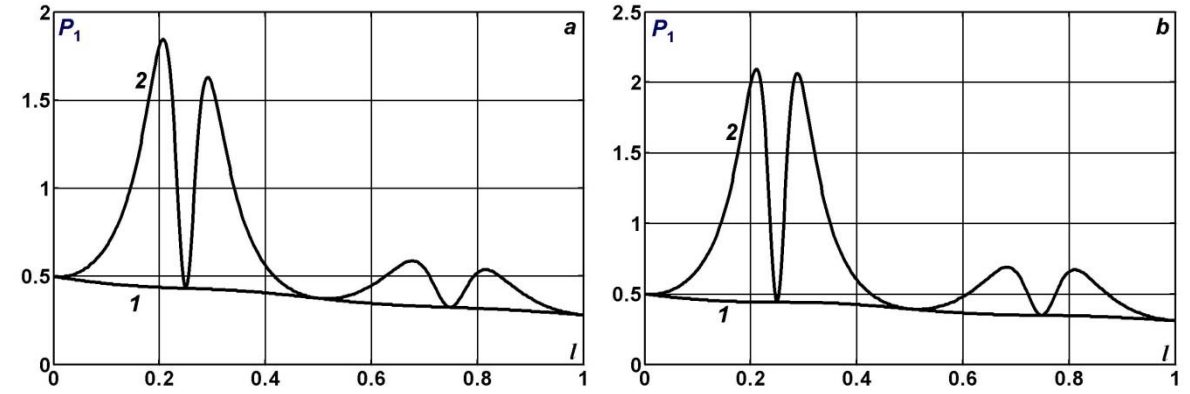


Рис. 8. Зависимость $P_1(X_S = 0)$ (1) и $P_1(X_S = X_{S,k})$ (2) от длины линии при $R_S = Z_B$ и $R = 0.48$, $G = R/5(a)$; $R = 0.48$, $G = 0(b)$

Зависимости КПД от длины линии, изображенные на рис. 9 показывают, что лишь в окрестности $x = 0{,}25$ волновой длинны линии можно наблюдать незначительное повышение значения данного параметра. На основе полученных расчетных данных можно утверждать, что стремление увеличить максимальное значение передаваемой мощности почти всегда сопровождается понижением КПД линии, иногда до недопустимо низкого уровня.

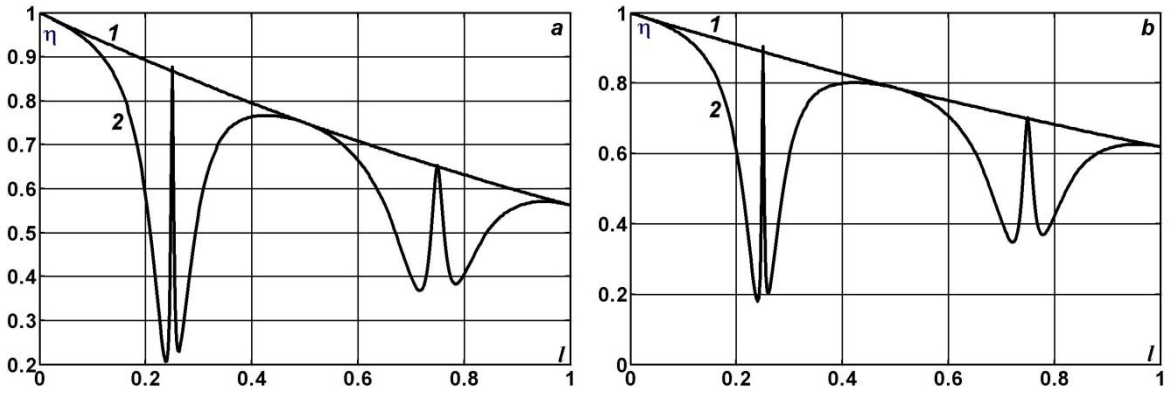
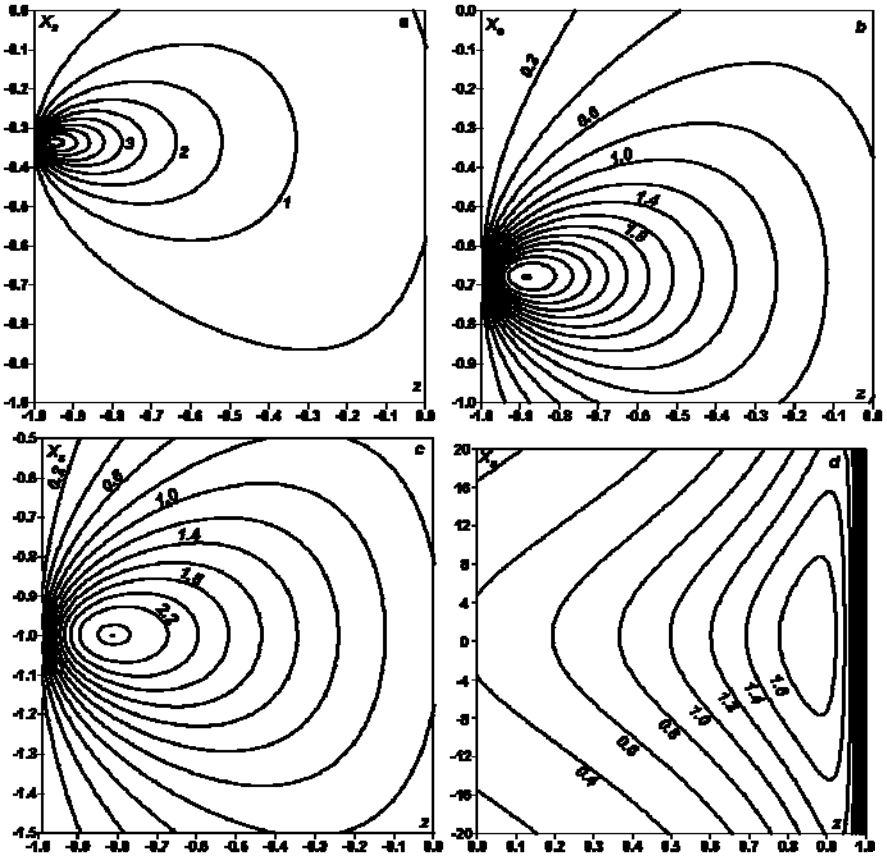


Рис. 9. Зависимость η ($X_S = 0$) (1) и η ($X_S = X_{S,k}$) (2) от длины линии при $R_S = Z_B$ и $R = 0.48$, $G = R/5(a)$; $R = 0.48$, $G = 0(b)$

На рис. 10 приведены обобщенные данные об областях изменения реактивного сопротивления X_S нагрузки $Z_S = R_S + jX_S$ для которого удается передавать максимальное значение активной мощности в нагрузку. На рис. 10 приведены линии уровня функции $P_1(z, X_S)$ для различных длин линии используемой для передачи мощности от генератора в нагрузку. Из представленных результатов видно, что в случае подключения к линии активной нагрузки в точках, соответствующих четверти или половине волновой длине линии невозможно добиться повышения абсорбируемой этой нагрузкой активной мощности, которая бы превышало значение характерное для чисто активной нагрузки. В этих случаях максимальное значение передаваемой мощности достигается для условия $X_S = 0$.



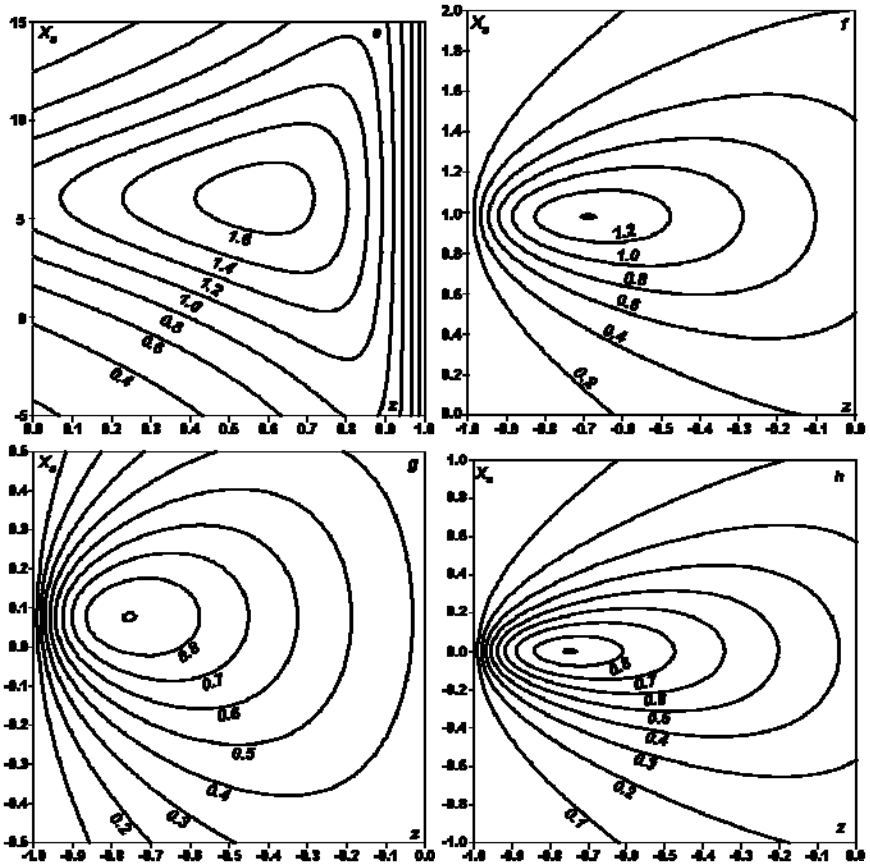


Рис. 10. Зависимость передаваемой мощности от комплексного сопротивления нагрузки при R = 0,48 и G = R/5; l = 0,0516 (*a*);0,0949 (*b*); 0,125 (*c*); 0,25(*d*); 0,2684(*e*); 0,375(*f*); 0,488(*g*); 0,5(*h*)

Выводы

1. При чисто активной нагрузке R_S значения максимумов функций от независимой переменой z, представляющих мощность на входе линии $P_0 = F(z)$, передаваемой по линии активной мощности $P_1 = F(z)$, коэффициента полезного действия линии $\eta = F(z)$, а также коэффициента мощности на входе линии $\cos\varphi_0$, коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_S$ имеют место при различных значениях сопротивления нагрузки. Значения активного сопротивления соответствующего максимумам рассмотренных функции названы «критическое сопротивление – $R_{x,k}$», причем для функции входной и выходной мощности наблюдается «разбегание» расположения значений критических сопротивлений $R_{0,k}$ и $R_{1,k}$, тогда как для точек максимума функций η, $\cos\varphi_0$ и $\cos\varphi_S$ не наблюдается такого «разбегания».
2. Компенсация параметров нагрузки в последовательной схеме замещения позволяет увеличить передаваемую мощность в линиях с потерями сравнительно небольшой протяжности, т.е. в линиях имеющих длины меньше ¼ длины электромагнитной волны. У неискажающих линий такого эффекта не наблюдается вообще.
3. При компенсации реактивного сопротивления нагрузки возможен режим, при котором значение передаваемой мощности превышает значение, характерное для случая работы линии только на активную нагрузку. Максимум передаваемой

мощности наблюдается для случая линии с длинной равной 0,3λ (волновой длины линии).

4. Оптимальное значение реактивного сопротивления $X_{S,\eta}$ (критическое), которое соответствует режиму компенсации реактивной мощности нагрузки, изменяется в зависимости от длины линии в широком диапазоне, но для принятых параметров длинной линии имеет положительной значение, т.е. имеет индуктивный характер.
5. Получены обобщенные данные о передаче максимальной мощности в нагрузку для линий различных длин и при изменении нагрузки от режима холостого хода до режима короткого замыкания. Эти данные могут быть использованы при предварительном анализе эффективности работы электрических линий при переменной нагрузке.

5. Литература

[1] Электроэнергетика. Исторический очерк. http://www.sapov.ru/consul/reports/electro/el-sense_04.htm.
[2] BERZAN, V.P; RIMSCHI, V.X.; TIRSU, M.S.; PATSYUK, V.I.; UZUN, M.N. About some features of the power transfer mode on the long transmission line. Euro-Asian Jornal of sustainable energy development policy, 2013, vol.4, nr. 1, January-June 2011, p.1-10.
[3] КОВАЛЕВ, Г.Ф.; ЛЕБЕДЕВА, П.М. Планетарная электроэнергетическая система. – Энергия, 2006, №9, с. 27–34.
[4] ЗИЛЬБЕРМАН,С.М.; Самородов, Г.И. Возможные перспективы импорта электроэнергии в Республику Молдова из Тюменского региона. Труды Международной конференции «Энергетика Моловы- 2005» Кишинев. 2005, Типография АНМ, сс. 104-110.
[5] РИМСКИЙ В.К.; БЕРЗАН В.П.; ПАЦЮК В.И.; КАРЧЕВА Н.Ф.; АНДРОС И.В. Волновые явления в неоднородных линиях. Том 4. Параметрические цепи. К.: Тип. АН Молдовы, 2008.-552с.-ISBN 978-9975-62-075-8
[6] БЕССОНОВ, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи /Учебник для ВТУЗов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559с
[7] Нейман Л.Р. Теоретическая электротехника. Избранные труды. – Л.: Наука, ЛО, 1988. – 334с.
[8] Rimschi V., Berzan V., Tîrşu M., Uzun M., Rimschi S. Soluţii precise a ecuaţiilor telegrafiştilor. – Chişinău: Tipografia AŞM, 2007. –86p.
[9] Круг К.А. Основы электротехники. – Л.: ОНТИ, 1936. –888с.
[10] Ковалев Г.Ф., Лебедева П.М. Планетарная электроэнергетическая система. – Энергия, 2006, №9, с. 27–34.

Сведения об авторах

	Пацюк В.И. Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики АНМ и доцент Государственого Университета Молдовы. Область научных интересов: численные методы расчета, математическая физика, механика твердого тела, теоретическая электротехника и энергетика. Автор более 100 научных публикаций, в том числе 1 патента и 10 монографий.
	Берзан В.П. Доктор хабилитат в технике. Директор Института энергетики АНМ. Область научных интересов, диагностика энергетического оборудования, нестационарные процессы в неоднородных электрических цепях, математическое моделирование, транспорт электроэнергии на большие расстояния, возобновляемые источники энергии. Автор более 250 научных публикаций, в том числе 20 патентов и 12 монографий. E-mail: berzan@ie.asm.md.
	Анисимов В.К. Доктор технических наук, зав. Лабораторией «Моделирование и диагностика энергетического оборудования» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: неразрушающие методы контроля и диагностики, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, технологии получения водородачисленные методы расчета. Автор более 80 статьей и 80 изобретений.
	Кабак С.С. Доктор технических наук, научный сотрудник Лаборатории «Моделирование и диагностика энергетического оборудования» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: физика полупроводников и устройства на их основе, возобновляемая энергетика на основе прямого преобразования солнечной энергии фотопреобразовательными модулями. Автор 13 научных статьей.
	Посторонка Св. А. Научный сотрудник Института энергетики АНМ. Область научных интересов, диагностика энергетического оборудования, возобновляемые источники энергии. Автор 20 научных публикаций, участник международных салонов по инвентике. Отмечен дипломами и бронзовыми медалями.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК „В ЗИГЗАГ”

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

Аннотация. На основе предложенной ранее модели проведены расчеты и изучены особенности установившихся несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора с трехстержневой конструкцией магнитопровода и схемой соединения обмоток в зигзаг с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Расчеты и анализ проведены на примере распределительного трансформатора 10/0,4 кВ и включают наиболее характерные установившиеся несимметричные режимы, возникающие при различных коротких замыканиях, в том числе, при наличии магнитного потока нулевой последовательности. Для рассмотренных режимов построены векторные диаграммы токов и напряжений, а также относительных значений потока, которые дают наглядное представление об их особенностях.
Ключевые слова: Исследование на модели, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, схема соединения обмоток в зигзаг, магнитный поток нулевой последовательности.

INVESTIGAREA MODURILOR ASIMETRICE A TRANSFORMATOARELOR TRIFAZAȚI CU MIEZ DIN TREI TIJE CU SCHEMA CONECTĂRII BOBINELOR IN ZIGZAG

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

Rezumat. În baza modelului propus anterior au fost efectuate calculele şi au fost investigate particularităţile modurilor permanente asimetrice a transformatorului trifazat cu miez din trei tije şi cu schema de conexiune a bobinelor în zigzag, ţinând cont de cuplarea electromagnetică dintre înfăşurările situate pe diferite tije. Calculele şi analiza respectivă a fost efectuată în transformatorul de distribuţie 10/0, 4 kVşi conţine cele mai caracteristici moduri permanente asimetrice, care apar la scurt-circuite, inclusiv, asociate cu apariţia fluxului magnetic de secvenţa homopolară. Pentru regimurile luate în consideraţie sunt construite diagrame vectoriale pentru curenţi şi tensiuni, precum şi pentru valorile relative ale fluxului magnetic, care oferă o imagine clară despre caracteristicile acestor regime.
Cuvinte-cheie: Investigaţiile în baza modelului, moduri asimetrice, miez din trei tije, schema de conexiune a bobinelor în zigzag, fluxul magnetic de secvenţă homopolară.

INVESTIGATION OF ASYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE THREE–LEG TRANSFORMER WITH WINDINGS CONNECTION IN ZIGZAG

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

Abstract. Calculations and analysis were performed and specific characteristics of steady state asymmetric modes were investigated in three-phase three-leg transformer with zigzag diagram of windings connection, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. Calculations and analysis were performed for the distribution transformer of 10/0.4 kV. The most characteristic steady state asymmetrical modes, which occur during different short circuits, were investigated, including those, associated with the occurrence of zero sequence magnetic flow. For the considered regimes vector diagrams were constructed for currents and voltages, as well as for the relative values of magnetic flow, which give a clear idea about their particular features.
Keywords: Simulation, asymmetric modes, three legs magnetic circuit, zigzag windings connections, zero-sequence magnetic flow.

Введение.

Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых трансформаторов посвящено достаточно большое количество работ, основы были заложены в классических книгах Петрова Г.Н., Вольдека А.И., Васютинского С.Б.[1-4] и др., затем исследования продолжены в [5-10] и др. (перечень не является исчерпывающим). Тем не менее, публикации, развивающие различные аспекты этой проблемы, в том числе с использованием вновь создаваемых математических моделей трехфазных трансформаторов, продолжают появляться, в том числе и в последние годы [13-20]. Однако нет какой-либо публикации, где были бы подробно рассмотрены несимметричные режимы для схемы с соединением обмоток в зигзаг. Для выполнения данной работы использована предложенная авторами модель трехфазного трехстержневого трансформатора, описанная в [21].

Рассмотрим с помощью упомянутой модели особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового распределительного трансформатора со схемой У/z_0 при изолированной нейтрали на стороне среднего напряжения и заземленной нейтрали на стороне низкого напряжения. При расчетах используем каталожные исходные данные Минского трансформаторного завода (http://metz.by/) для распределительных трансформаторов для прямой последовательности (применительно к трансформатору типа ТМГ мощностью 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ имеем: I_0 =2,6%, Uкз= 4,7 %, Рхх=270 Вт, Ркз=2270 Вт).

Кроме того, для данного трансформатора изготовителем предоставлено измеренное сопротивление нулевой последовательности со стороны обмотки ВН (для схемы У/у0): Z_0=1,3 Ом, величина потерь в режиме холостого хода для нулевой последовательности принята равной P_{0xx} = 2000 Вт. На основании этих данных по общеизвестным формулам (например [22, стр. 185-190]) можно рассчитать действующие значения номинальных токов обмоток ВН (Івн =5,8 А) и НН (Інн=152 А), тока холостого хода на стороне ВН I_0 =0,15 А, номинальных напряжений обмоток ВН (5,77 кВ) и НН (127 В), активных сопротивлений и сопротивлений короткого замыкания пар обмоток, а также всех других величин, которые необходимы для построения данной модели.

Похожий вариант трансформатора рассматривается, например, в работах [11,12]. Во второй работе приведены более подробные данные о величинах токов короткого замыкания для различных схем трансформаторов с высшим напряжением 6 кВ, в том числе и для схемы зигзага, однако для корректного сравнения результатов необходимо располагать полными исходными данными по параметрам трансформаторов, заложенными в [12]. Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не в виде таблиц с числами, а в виде векторных диаграмм (ВД), а численные значения - приводить по мере необходимости. На ВД рис. 1, 2 приведены в качестве характеристики исходного режима вектора напряжений первичных и вторичных обмоток трансформатора по схеме равноплечего зигзага (при этом количества витков и величины напряжений вторичных полуобмоток, образующих зигзаг, одинаковы). Обмотки, расположенные на одном стержне и относящиеся к одной из фаз, обозначены буквами А, В, С, цифры 1,2,3 относятся к первичной и вторичным обмоткам. Соответственно, напряжения фаз нагрузки содержат в индексе обозначения обмоток, напряжения которых суммируются для получения соответствующего плеча нагрузки (причем первой записана обмотка, соединенная с нейтральной точкой – т.е., например, имеется фаза нагрузки U_{A2B3}).

На последующих рисунках приведены в виде векторных диаграмм токов результаты расчетов различных несимметричных режимов. На рис. 3 построены ВД напряжений на обмотках НН и на нагрузке при однофазном коротком замыкании (ОКЗ, закорочена нагрузка А2В3), в качестве исходного принят симметричный режим нагрузки по рис. 1,2. Как видно из ВД рис. 3 , напряжения в «здоровых» фазах нагрузки U_{B2C3} и U_{C2B3} (показаны пунктиром) несколько меньше номинального, а фазовый угол больше обычных 120° градусов. Система напряжений вторичных обмоток, составляющих зигзаг (напряжения первичных обмоток А1, В1, С1 выглядят аналогично, поэтому не показаны) искажена, при этом напряжения на закороченных полуобмотках А2В3 (как и следовало ожидать) одинаковы, на оставшихся полуобмотках А3, В2, составляющих здоровые фазы нагрузки, напряжения значительно ниже номинального значения в 127 В и имеют фазовый сдвиг менее нормального, а напряжения полуобмоток фазы С2,С3 также одинаковы, а их величина близка к номинальной. Ток ОКЗ, полученный в результате расчета, равен 113 А, что приблизительно согласуется с результатом, приведенным в [12] для напряжения 6 кВ. Картина магнитных потоков в стержнях в этом режиме приведена на рис. 4., из которого видно, что сумма потоков в стержнях приблизительно равна нулю, и следовательно, поток нулевой последовательности при данных условиях отсутствует, что, как известно, является существенным преимуществом схемы зигзага.

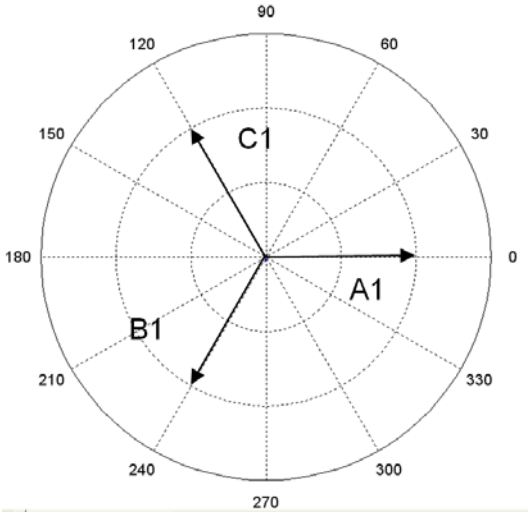


Рис. 1. ВД напряжений первичных обмоток, соединенных в звезду в симметричном режиме нагрузки

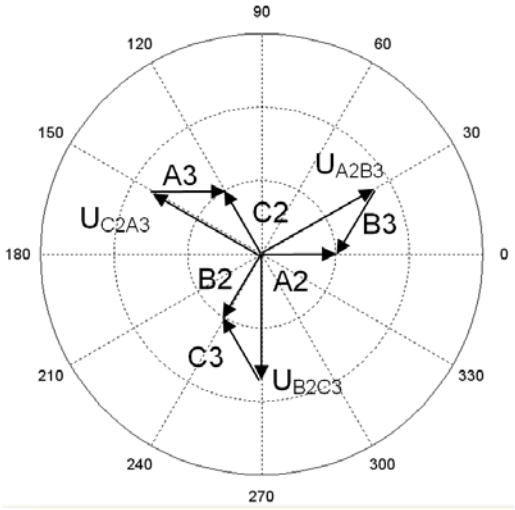


Рис.2. ВД напряжений нагрузки и вторичных обмоток, соединенных в зигзаг в симметричном режиме нагрузки

Кроме того, расчеты подтверждают, что звезда напряжений обмоток ВН остается симметричной и отсутствует смещение нейтрали. Следует отметить, что упомянутые положительные свойства схемы соединения в зигзаг имеют место только в случае одинакового числа полуобмоток, составляющих плечи зигзага. На рис. 5, 6 показаны ВД для рассмотренного режима ОКЗ нагрузки, соответствующие соотношению чисел витков полуобмоток 2:1. Из рис. 5, где приведены относительные значения потоков в стержнях, следует появление в этом случае значительного потока нулевой последовательности, кроме того, появляется смещение нейтрали на стороне ВН. Кардинально изменяется также не только картина магнитных потоков в стержнях, но и ВД напряжений на нагрузке и обмотках (рис. 6).

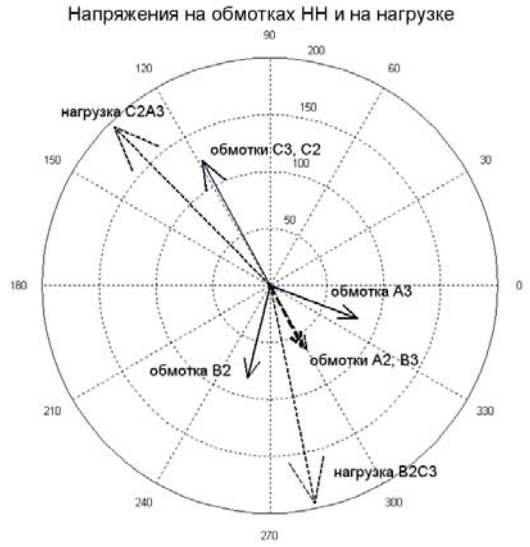


Рис. 3. Напряжения на обмотках НН и на нагрузке при замыкании одной из фаз нагрузки

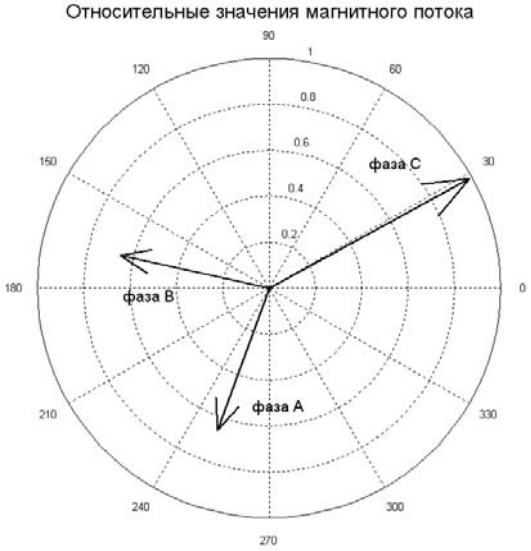


Рис.4. Относительные значения магнитных потоков в стержнях при ОКЗ нагрузки

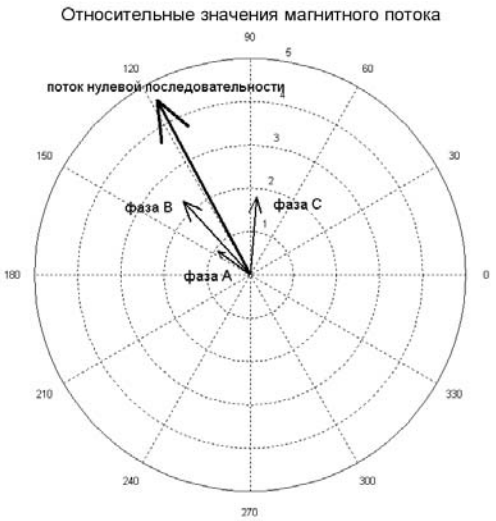


Рис. 5. Относительные значения магнитных потоков при ОКЗ нагрузки и неравноплечих обмотках, составляющих зигзаг

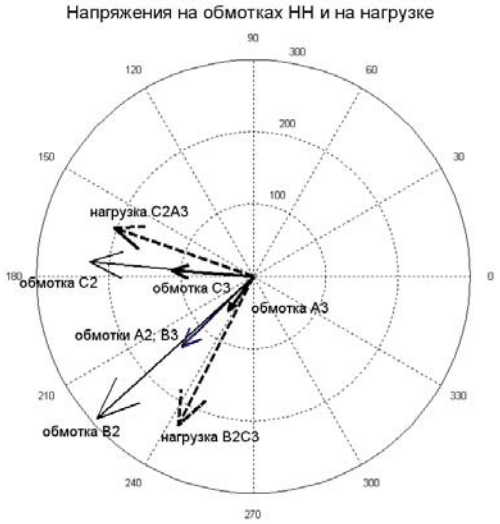


Рис.6. Напряжения на обмотках НН и на нагрузке при соотношении плеч зигзага 2:1 при однофазном к.з. нагрузки (U_{A2B3}=0)

Таким образом, при отличающихся числах витков полуобмоток, составляющих «плечи» зигзага, положительные свойства, свойственные данной схеме в несимметричных режимах работы, практически утрачиваются.

Рассмотрим далее менее вероятный, но также возможный режим замыкания двух плечей нагрузки между собой без земли (ДКЗ без земли) на стороне НН, при этом на них, естественно, будут одинаковые напряжения ($U_{\mathbf{A2B3}}$=$U_{\mathbf{B2C3}}$). На рис. 7 показана ВД напряжений обмоток НН и нагрузок при ДКЗ без земли. Напряжение на замкнутых нагрузках резко падает и трехфазная система напряжений на нагрузке сильно искажается.

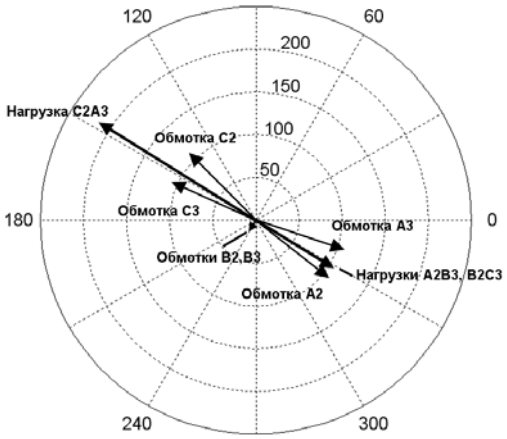


Рис.7. Напряжения нагрузок и обмоток НН при двухфазном к.з. (исходный режим-симметричная нагрузка)

Рис. 8. ВД токов источника при двухфазном кз без земли и при симметричной нагрузке

Видно также, что напряжения на обмотках В2 и В3 совпадают и почти не видны на ВД ввиду относительно небольшой величины. Кроме того, на всех обмотках стороны НН напряжение значительно ниже номинального. Как видно из рис. 8, сумма токов источника питания нулевая, что понятно, так как на стороне ВН нет пути для протекания токов нулевой последовательности, из расчета следует, что тока в нейтрали на стороне НН также нет, соответственно, нет и тока нулевой последовательности и потока нулевой последовательности. Величина наибольшего тока к.з. в этом режиме достигается в фазе В источника питания и равна 150 А.

Далее рассмотрим двухфазного короткого замыкания (ДКЗ) с землей. При этом напряжения двух плечей нагрузки $U_{A2B3}=U_{B2C3}$ =0. На рис. 9, 10 представлены ВД, построенные для данного случая. На рис. 9 представлены напряжения обмоток на стороне НН, видно, что при таком повреждении напряжения обмоток еще больше уменьшаются, однако система токов от источника питания остается уравновешенной и становится даже более симметричной, хотя наибольшее значение тока замыкания (рис.10) остается практически таким же.

Рис.9. Напряжения обмоток на стороне НН при двухфазном к.з. с землей

Рис. 10. Токи источника при двухфазном к.з. с землей

Токи от источника питания (рис.10) в этом режиме более симметричны, чем при ДКЗ без земли и также уравновешены.

Рассмотрим далее для полноты особый несимметричный режим, связанный с возможным внутренним повреждением трансформатора, а именно - однофазное замыкание одной из полуобмоток на стороне НН, примыкающей к нейтрали (в данном случае, фазы А). На рис. 11-14 приведены соответствующие ВД, построенные по результатам расчета. Как следует из рис. 11, где показаны токи замыкания от источника, они относительно невелики, значительно меньше тока ОКЗ, вследствие чего при таком повреждении релейная защита не сработает, однако трансформатор будет перегружаться повышенным током, поэтому желательно предусмотреть защиту от этого режима. Токи и напряжения нагрузки в этом режиме (см. рис.12) близки к симметричным, однако напряжения «здоровых» обмоток В2, В3 и С2, С3 сильно смещены по фазе относительно нормального положения. Из рис.13, где представлены напряжения первичных обмоток, соединенных в звезду с изолированной нейтралью, видно, что система напряжений первичных обмоток существенно несимметрична и имеет место значительное смещение нейтрали. Кроме того, в этом режиме (рис.14) имеется значительный поток нулевой последовательности.

Рис.11. Токи источника при ОКЗ полуобмотки, соединенной с нейтралью

Рис. 12. Напряжения обмоток на стороне НН и токи нагрузки при КЗ полуобмотки, соединенной с нейтралью

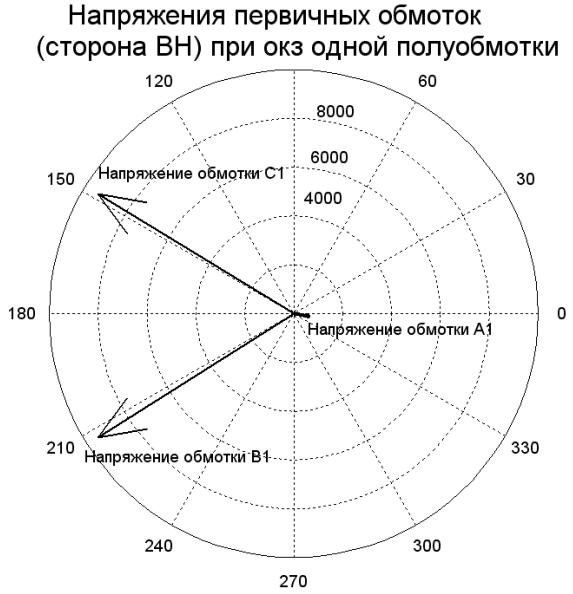


Рис. 13. Напряжения первичных обмоток при ОКЗ одной полуобмотки на стороне нагрузки

Рис. 14. Относительное значение магнитного потока в стержнях и суммарный поток в воздухе при ОКЗ полуобмотки

ВЫВОДЫ

1. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках распределительного трехфазного трехстержневого трансформатора с соединением вторичных обмоток в зигзаг при различных режимах короткого замыкания, построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов.
2. В режимах обычных однофазных и двухфазных коротких замыканий схема зигзага обеспечивает отсутствие тока и потока нулевой последовательности и, соответственно, меньшие искажения напряжений и токов в режимах несимметричных к.з. и нагрузки. Однако при неодинаковых числах витков обмоток, составляющих плечи зигзага, отмеченные преимущества этой схемы теряются. Кроме того, они также исчезают при однофазном замыкании одной из полуобмоток, очевидно, что похожий эффект будет происходить также при витковых замыканиях в обмотках.

Литература.

[1] Петров Г.Н. Трансформаторы, том.1, Основы теории, ГЭИ, 1934, 445 стр.
[2] Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М., «Энергия», 1974, 240 с.
[3] Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978, 832 с.
[4] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л., Энергия, 1970, 432 с.
[5] Сергеенков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Под редакцией Копылова И.П., М. Высшая школа, 1989, 352 с.
[6] Забудский Е.И. Электрические машины. Ч.1. Трансформаторы. М, 2002, 168 с.
[7] Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М, Энергоатомиздат, 1983, 527 с.
[8] Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат. Электричество, 1985 г. №12, стр. 6-12.
[9]. Гусейнов А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. Электричество, 1989, № 3.
[10]. Карасев Д. Д., Карасев Е.Д. Расчет режимов электрических сетей по программе «ФАЗАН». Под ред. А.И. Артемова. М.: Моск. энерг. ин-т., 1989.
[11] Фишман В., Федоровская А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток. Новости Электротехники, №5, 2006 г.
[12] Фишман В., Федоровская А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток. Новости Электротехники, №6 (60) 2009 год.
[13] Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы. "Новости электротехники" №5 (53) 2008 год
[14] В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Издательство Иркутского государственного университета, 2005 г. – 274 с. (с. 45 –модель трансформатора).

[15] 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.
[16] Мартынов В.А. Несимметричные режимы работы силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y0. «Вестник ИГЭУ» Вып. 2, 2009 г, с. 1-5.
[17] Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора, Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4.
[18] 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).
[19] Three-Phase Transformer 12 Terminals. 2012. URL: http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/threephasetransformer12terminals. html (дата обращения: 06.04.2012).
[20]URL:http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings. html (дата обращения: 20.09.2013).
[21 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), 2013 г.
[22] Электротехнический справочник: в 3-х томах, Т.2. М, Энергоатомиздат, 1986, 712 стр.

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.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДЕЛЬНО КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 330-500 кВ

Постолатий В.М., Суслов В.М.
Институт энергетики АН Молдовы

Аннотация. Определена оптимальная конфигурация расположения фаз двухцепных компактных управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (КУСВЛ) напряжением 330-500 кВ по условию достижения максимально допустимой величины напряженности электрического поля на поверхности расщепленных фаз при заданной их конструкции. Рассчитаны параметры данных линий при крайних значениях углового сдвига (θ) между системами векторов напряжений цепей. Показано, что величина волнового сопротивления КУСВЛ без применения специальных фазоповоротных устройств (ФПУ) (то есть при θ=0˚) минимальна и составляет (для каждой фазы) для варианта 330 кВ с проводами 3хАС-300/39–196 Ом, а для 500 кВ с проводами в фазе 6хАС-240/39 – 162 Ом. Величина натуральной мощности рассмотренных линий (на обе цепи) при номинальном напряжении при этом максимальна и составляет 1118 МВт (для линии 330 кВ) и 3080 МВт (для линии 500 кВ). При переводе линий в режим угла θ = 180˚ (с помощью специальных ФПУ) волновое сопротивление максимально, а пропускная способность минимальна. Отношение максимальной величины натуральной мощности к минимальной при этом (регулировочный диапазон) достигает значения до 1,5.

Ключевые слова: Компактность, управляемость, самокомпенсация, линия электропередачи, волновое сопротивление, натуральная мощность, оптимизация конструкции, напряженность электрического поля.

CARACTERISTICILE LINIILOR DIRIJATE ŞI DE AUTOCOMPENSARE EXTREM DE COMPACTE DE TENSIUNE ÎNALTĂ 330-350 kV

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

Rezumat. Este determinată configuraţia optimă a fazelor liniilor electrice dirijate compacte cu circuitul dublu, autocompensate, de tensiune înaltă 330-500 kV (KUSVL), cu condiţia atingerii valoarii maxime admisibile a tensiunii câmpului electric pe suprafaţa fazelor divizate pentru designul lor definit. Sunt calculaţi parametrii acestor linii pentru valorile extreme ale decalajului de faza (θ) între sistemele vectoriale ale tensiunelor circuitelor. Este arătat, că valoarea impedanţei caracteristice a KUSVL fără utilizarea dispozitivelor speciale de rotaţie a fazei (adică la θ = 0 ˚) este minimală, şi constitue (pentru fiecare fază) pentru opţiunea liniei cu tensiunea 330 kV şi fire 3AS-300/39 -196 Ohmi, iar pentru linia 500 kV cu conductoarele de fază 6AS-240/39 - 162 Ohmi. Valoarea puterii characteristice liniilor considerate (pentru ambele circuite) la tensiunea nominală este cea maximă şi constituie 1118 MW (pentru linia 330 kV) şi 3080 MW (pentru linia 500 kV). La trecerea liniei la unghiul θ = 180˚ (cu ajutorul aparatelor speciale de decalaj de fază) impedanţa characteristică este maximală, iar capacitatea de transmisie - minimă. Relaţia între valoarea maximală a capacităţii de transmisie şi valoarea minimală (coeficientul de reglare) atinge valori de până la 1,5.

Cuvinte-cheie: Compactă, dirijabilă, auto-compensare, linia de transmisie a puterii electrice, puterea caracteristică, optimizarea de construcţie, intensitatea câmpului electric.

CHARACTERISTICS OF POWER SELF-COMPENSATED TRANSMISSION LINES EXTREMELY COMPACT 330-350 kV

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

Abstract. The optimal configuration of phases placement of double circuit compact controlled self-compensated high-voltage power lines (KUSVL) with the voltage of 330-500 kV at the condition of achieving of the maximum admissible value of the electric field tension on the surface of split phase at a given design was determined. The parameters of these lines at the extreme values of the angular shift (θ) between the circuits' systems voltages were calculated. It was shown, that the surge impedance of KUSVL without special phase-shifting transformers (e.g. θ = 0˚) is minimal, and is equal (for each phase) for the option of 330 kV and wires 3AS-300/39 - 196 ohms, and for voltage of 500 kV and phase conductors 6AS-240/39 –162 ohms. The magnitude of transmission capacity of

considered line (for both circuits) at rated voltage is maximal and equal to 1118 MW (for 330 kV line) and 3080 MW (for 500 kV line). At changing of line to the mode of angle θ = 180˚ (with special phase-shifting transformer) surge impedance is maximal and the transmission capacity minimal. Ratio of the maximal value of transmission capacity to the minimal (regulation range) reaches values of up to 1.5.
Keywords: Compact, controllability, self-compensation, power transmission line, surge-impedance power, design optimization, the electric field strength.

Введение

К настоящему времени выполнен большой комплекс работ в области управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередач (УСВЛ) различных классов напряжения с различной конфигурацией расположения фаз на опоре [1-3]. В этих работах показано, что величина натуральной мощности УСВЛ в 1,4-1,6 раза больше, чем у обычных линий того же класса напряжения (в расчете на одну цепь). Кроме того, УСВЛ позволяют путем изменения углового сдвига между системами векторов напряжений цепей регулировать их эквивалентные параметры до 1,5-кратной величины. В выполненных ранее работах, в основном, исследовались варианты линий с горизонтальным расположением фаз при попарном сближении фаз разных цепей и при общепринятых расстояниях между остальными фазами.

Цель работы

В настоящей работе исследованы новые конфигурации УСВЛ с предельно компактным расположением всех фаз линии (по кругу) напряжением 330- 500 кВ.

1. Результаты исследований.

На примере двухцепных КУСВЛ классов напряжения 330-500 кВ выполнены оптимизационные расчеты взаимного расположения фаз при задании максимально допустимой величины напряженности электрического поля на поверхности проводов для всех фаз (при недопущении коронного разряда при нормальных климатических условиях эксплуатации, в соответствии с требованиями ПУЭ).

В качестве рассматриваемых приняты КУСВЛ 330 кВ с проводами в фазах 3хАС-330/39 и КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39. Рассматриваемые варианты новых предельно компактных конфигураций расположения фаз данных вариантов КУСВЛ представлены на рис 1-2. На них буквами А, В,С обозначены фазы 1-й цепи, а буквами А’, В’, С’ – фазы
2-й цепи. Конфигурация расположения фаз принята по кругу. При этом сближенными являются фазы разных цепей, а одноименные фазы разных цепей максимально возможно, для данной конфигурации, удалены друг от друга.

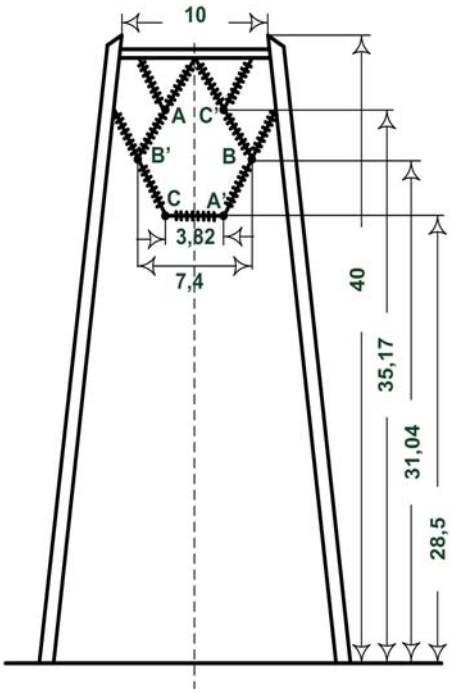


Рис. 1. Двухцепная компактная УСВЛ -330кВ

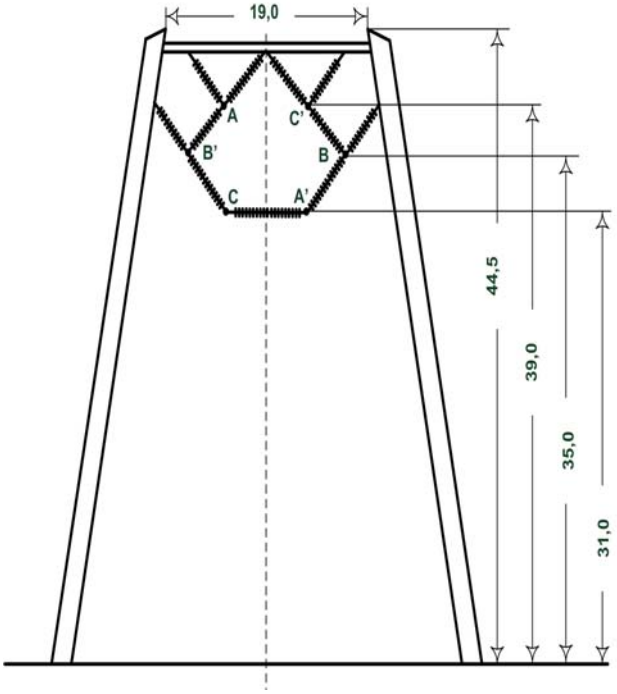


Рис. 2. Двухцепная компактная УСВЛ –500кВ

Оптимизации проводилась в среде EXCEL по специально разработанному алгоритму. Суть данного алгоритма состоит в следующем.

В качестве исходных для каждого варианта линии взяты следующие данные:

1) Максимальная нормативная напряженность электрического поля на поверхности проводов фаз.
2) Номинальное напряжение линии.
3) Радиусы проводов.
4) Количество составляющих и радиус расщепления фаз.
5) Стрелы провесов фаз.
6) Координаты расположения фаз на опорах (X - берется относительно центральной оси опоры, а Y - относительно поверхности земли).

Суть разработанного алгоритма состоит в следующем:

1. Фиксируется конструкция расщепленных фаз.
2. Фиксируется габарит линии.
3. Задается первоначальное расположение фаз линии.
4. Задается требуемое ограничение на минимальную величину сближения фаз между собой.
5. Задается условие симметрии расположения фаз.
6. Задается требуемое ограничение на максимальную величину напряженности электрического поля на поверхности проводов фаз линии.
7. Выполняется оптимизация взаимного расположения фаз по критерию максимизации напряженностей электрического поля на поверхности всех проводов всех фаз линии с учетом всех заданных ограничений. (При этом обеспечивается максимально возможная и равная между собой рабочая емкость всех фаз).

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблицах 1-2, а параметры при крайних углах сдвига систем векторов напряжений цепей (0˚-180˚) в таблицах 1-4.

Эквивалентные параметры и характеристики КУСВЛ приведены в нижних частях таблиц.

Для указанных оптимизированных вариантов емкостная проводимость и индуктивное сопротивление приведены для каждой фазы на единицу длины линий, а волновое сопротивление и натуральная мощность на каждую цепь линий.

Таблица 1

Таблица оптимизации двухцепной КУСВЛ-330 кВ с проводами 3хАС-330/39

Нормативная напряженность, кВ/см	28											
Номинальное напряжение, кВ	363											
Радиус провода, мм	12											
Количество расщеплений фазы	3											
Радиус расщепления фазы, м	0,25											
Стрела провеса, м	20,5											
Координаты проводов, м												
	Начальные (до оптимизации)						Конечные (после оптимизации)					
X	-1,5	4,5	-1,5	1,5	-4,5	1,5	-1,91	3,708	-1,92	1,917	-3,71	1,907
Y	34	31	28,5	28,5	31	34	35,17	31,84	28,5	28,5	31,84	35,17
Емкостная проводимость, мкСм/км	5,41											
Индуктивное сопротивление, Ом/км	0,21											
Волновое сопротивление, Ом	195,9											
Натуральная мощность, МВт	672,8											

Таблица 2

Таблица оптимизации параметров двухцепной КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39

Нормативная напряженность, кВ/см	28											
Номинальное напряжение, кВ	525											
Радиус провода, мм	10,8											
Количество расщеплений фазы	6											
Радиус расщепления фазы, м	0,4											
Стрела провеса, м	23											
Координаты проводов, м												
	Начальные (до оптимизации)						Конечные (после оптимизации)					
X	-1,5	4,5	-1,5	1,5	-4,5	1,5	-1,91	3,708	-1,92	1,917	-3,71	1,907
Y	34	31	28,5	28,5	31	34	35,17	31,84	28,5	28,5	31,84	35,17
Емкостная проводимость, мкСм/км	6,51											
Индуктивное сопротивление, Ом/км	0,17											
Волновое сопротивление, Ом	162,2											
Натуральная мощность (на цепь) МВт	1699,6											

Таблица 3

Параметры оптимизированной КУСВЛ-330 кВ с проводами 3хАС-330/39

Номинальное напряжение, кВ	330						
Угол сдвига фаз между цепями	0						
Радиус троса, мм	5,7						
Радиус провода, мм	12						
Количество расщеплений фазы	3						
Радиус расщепления фазы, м	0,25						
Стрела провеса, м	20,5						
Абсцисса тросов и проводов, м							
-5	5	-1,9	3,7	-1,9	1,9	-3,7	1,9

Ордината троса/ов и проводов, м							
40	40	35	32	28,5	28,5	32	35
Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 0 º.							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		25,94	25,58	25,31	25,31	25,58	25,94
Емкостная проводимость, мкСм/км					5,45		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,207		
Волновое сопротивление, Ом					194,8		
Натуральная мощность, МВт					559		
Угол сдвига фаз между цепями, град.					180		
Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 180 º.							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		18,44	18,13	18,16	18,16	18,13	18,44
Емкостная проводимость, мкСм/км					3,88		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,294		
Волновое сопротивление, Ом					275,2		
Натуральная мощность (на цепь), МВт					395,7		

Таблица 4

Параметры оптимизированной КУСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-240/39

Номинальное напряжение, кВ					500		
Угол сдвига фаз между цепями					0		
Радиус троса, мм					5,7		
Радиус провода, мм					10,8		
Количество расщеплений фазы					6		
Радиус расщепления, м					0,4		
Стрела провеса, м					23		
Абсцисса тросов и проводов, м							
-9,5	9,5	-2,5	5,5	-2,5	2,5	-5,5	2,5
Ордината тросов и проводов, м							
44,5	44,5	39	35	31	31	35	39
Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 0 º.							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		26,69	26,54	26,7	26,7	26,54	26,7
Емкостная проводимость, мкСм/км					6,50		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,171		
Волновое сопротивление, Ом					162,4		
Натуральная мощность (на цепь), МВт					1540		
Угол сдвига фаз между цепями					180		
Параметры КУСВЛ при угле сдвига фаз напряжений между цепями, равном 180 º.							
Модуль напряженности электрического поля (кВ/см)		18,32	17,42	18,59	18,59	17,42	18,32
Емкостная проводимость, мкСм/км					4,42		
Индуктивное сопротивление, Ом/км					0,258		
Волновое сопротивление, Ом					241,5		
Натуральная мощность (на цепь), МВт					1035		

2. Регулировочный диапазон изменения параметров КУСВЛ классов напряжения 330-500 кВ

Новое качество УСВЛ любого типа состоит возможность в достаточно широких пределах регулировать их эквивалентные параметры путем изменения углового сдвига систем векторов напряжений цепей в пределах от 0 до 180 градусов. Количественной характеристикой этой возможности является регулировочный диапазон, который определяется соотношением эквивалентных параметров этих линий при двух предельных величинах этого угла (0 и 180 градусов).

Указанный диапазон определяется коэффициентом, равном отношению волновых сопротивлений по формуле:

$$k_p = \frac{z_в^{180}}{z_в^{0}},$$

где $z_в^{180}$ – волновое сопротивление линии (на цепь) при θ=180˚,
$z_в^{0}$ – волновое сопротивление линии (на цепь) при θ=0˚,
k_p – коэффициент регулирования.

Здесь следует отметить следующее.

Из данных, приведенных выше в соответствующих таблицах, видно, что указанный коэффициент регулирования находится в пределах 1,4-1,5, что свидетельствует о том, что диапазон регулирования КУСВЛ не уступает этому же показателю для ранее рассмотренным вариантам УСВЛ с горизонтально расположенными попарно сближенными фазами.

Особенностью данного варианта является противоположный характер изменения пропускной способности при регулировании угла сдвига систем векторов напряжений цепей (максимум пропускной способности у КУСВЛ при угле θ=0˚, а минимум – при угле θ=180˚; а у УСВЛ с горизонтальным расположением попарно сближенных фаз – максимум пропускной способности при θ=180˚, а минимум - θ=0˚.)

Кроме того, достоинствами КУСВЛ с круговым расположением фаз являются во первых то, что максимальная пропускная способность достигается при естественном (без применения дополнительных фазосдвигающих устройств) нулевом сдвиге систем векторов напряжений цепей, а во вторых то, что обеспечивается максимально возможная компактность линии в целом, особенно в отношении величины ее полосы отчуждения (под строительство).

Выводы

1. Предлагаемая новая компактная конструкция двухцепной УСВЛ с максимально возможно сближенными фазами, расположенными по кругу, при противостоянии одноименных фаз разных цепей является наиболее компактной по сравнению с другими вариантами УСВЛ.
2. Регулировочный диапазон данного варианта не уступает другим вариантам УСВЛ.
3. Особенностью вариантов КУСВЛ является то, что максимум пропускной способности у них достигается при угле θ=0, а минимум – при угле θ=180˚, т.е. КУСВЛ с круговым расположением фаз обладает противоположным характером изменения пропускной способности при регулировании угла сдвига систем векторов напряжений цепей по сравнению с УСВЛ с горизонтальным расположением фаз.

Литература

[1] Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Управляемые линии электропередачи. Под редакцией профессора В.А. Веникова. Кишинев, «Штиинца», 1984.
[2] В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. Электричество, №2, 2010, стр. 7-14.
[3] Шакарян Ю.Г., Тимашева Л.В., Кареева С.Н., Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М. Технические аспекты создания и режимные особенности работы в энергосистемах компактных управляемых ВЛ 220-500 кВ. «ТРАВЭК», 8-9 ноября 2011.

Сведения об авторах

Постолатий В.М., гл.н.с., академик АН Молдовы, д.т.н. Область научных интересов: энергетические системы, управляемые линии электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, проблемы передачи энергии, режимы энергетических систем, переходные электромеханические процессы, электрические станции, теплоэнергетика, экономика энергетики, вопросы управления энергетическим комплексом.

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.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ОКРЕСНОСТИ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Пацюк В.И.
Институт Энергетики АНМ

Аннотация. В статье рассматривается новый подход применения метода конечных объемов для расчета электрического поля в пространственно-неоднородной трехмерной среде. Сформулирована задача Дирихле с построением расчетной сетки на основе разбиения пространства, известного как триангуляция Делоне с применением в расчетной схеме ячеек Вороного. Предлагается численный алгоритм для расчета потенциала и напряженности электрического поля в пространстве в окрестности опоры линии электропередачи. Разработан алгоритм и программа численного счета в среде приложения Matlab. Приведены результаты расчета распределения в пространстве потенциала и напряженности электрического поля.
Ключевые слова: Электрическое поле, неоднородная среда, потенциал, напряженность электрического поля, численный метод.

REPARTIȚIE TRIDIMENSIONALĂ A CÂMPULUI ELECTRIC ÎN VECINĂTATEA PILONULUI ELECTRIC

Pațiuc V.I.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În lucrare se examinează o nouă abordare a utilizării metodei volumelor finite pentru a calcula câmpul electric în mediul tridimensional neomogen spațial. S-a formulat problema Dirichlet cu construirea rețelei de divizare denumită trianghiularea Delaunay şi celulele Voronoi. S-a propus algoritmul de calcul numeric a potențialului şi intensității câmpului electric în spațiul în vecinătatea pilonului electric. A fost elaborat algoritmul şi programa de calcul în mediul aplicației Matlab. Sunt prezentate rezultatele calculelor repartiției potențialului şi a intensității câmpului electric în spațiu.
Cuvinte-cheie: Câmp electric, mediu neomogen, potențial, intensitatea câmpului electric, metodă numerică.

POTENTIAL DISTRIBUTION IN VICINITY OF TRANSMISSION LINE SUPPORT

Patsiuk V.I.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper examines a new approach to finite volume method which is used to calculate the electric field of spatially inhomogeneous three-dimensional environment. The Dirichlet problem is formulated and the computational grid is constructed on the base of space partition, which is known as Delaunay triangulation with the use of Voronoi cells. To calculate the potential and the electric field strength in the vicinity of the electric line support the numerical algorithm is proposed. We have developed the algorithm and the corresponding software using Matlab application. There are presented some numerical results of calculations of the distribution of potential and of the electric field strength.
Keyword: Electric field, inhomogeneous medium, potential, electrical field strength, numerical method.

1. Введение

Целью работы является расчет потенциала и напряженности электростатического поля в окрестности опоры высоковольтной линии электропередачи напряжения 500 кВ.

2. Постановка краевой задачи

Рассмотрим задачу определения трехмерного распределения потенциала $u(x, y, z)$ электростатического поля в многосвязной области Ω, в которой относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_a(x, y)$ принимает кусочно-постоянное значение: ε_a = 1 в воздухе и ε_a = 6 внутри изолятора. На рис. 1 изображена область Ω, которая представляет собой параллелепипед со сторонами длиной $2L_x$, L_y, L_z, окружающий опору с подвешенными проводами. Нижние три провода находятся под напряжением

500 кВ, а верхние два имеют нулевой потенциал. Плоскость $z = 0$ является плоскостью поверхности земли с нулевым потенциалом. Потенциал опоры также равен нулю. Предполагается, что плоскости $x = L_x$, $x = -L_x$ и $z = L_z$ расположены на достаточно большом расстоянии от опоры и поэтому на них также потенциал равен нулю. На плоскостях $y = 0$ и $y = L_y$ задаются условия симметрии.

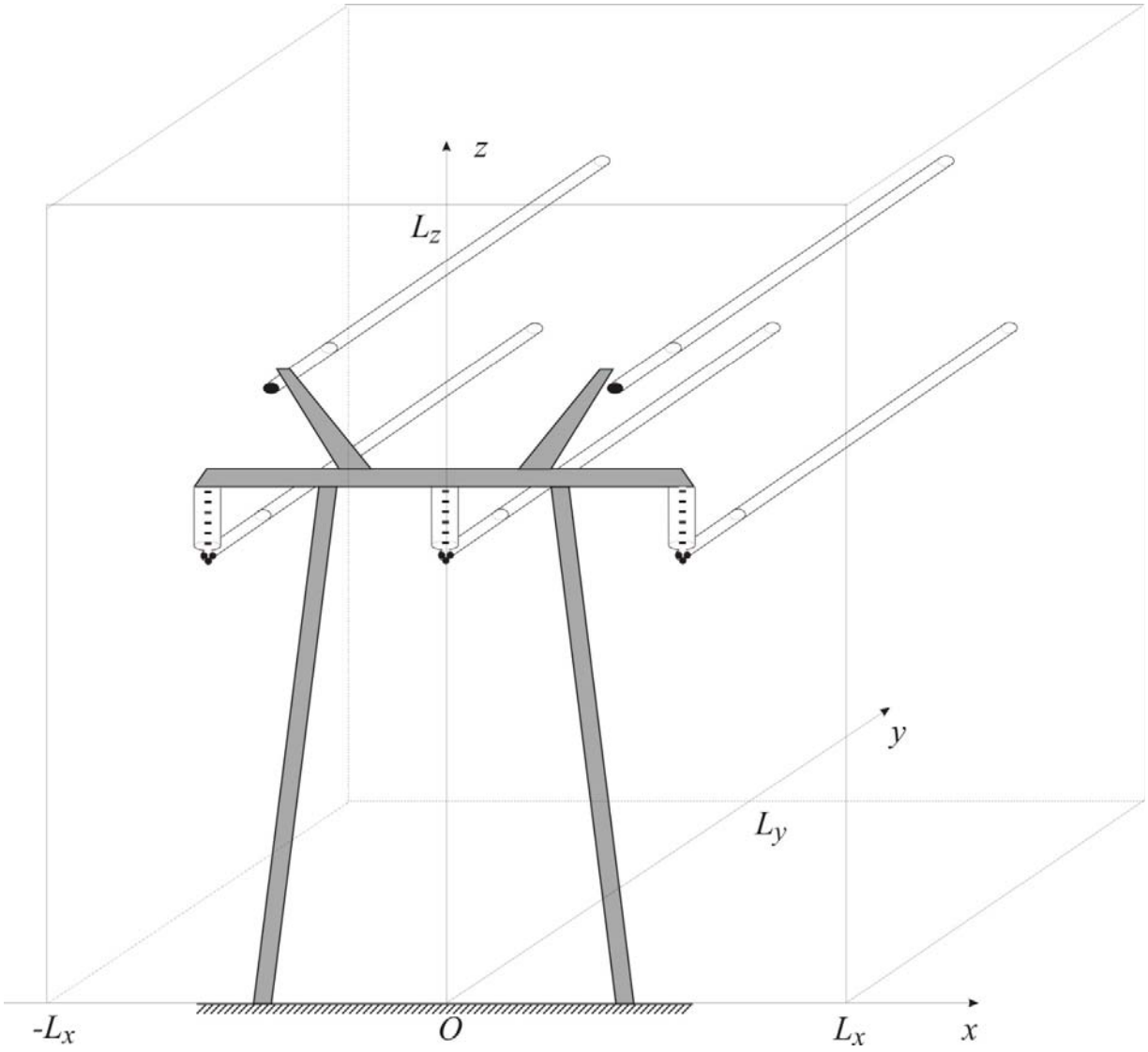


Рис. 1. ВЛ 500 кВ стандартного исполнения с горизонтальной подвеской проводов

Функция $u(x, y, z)$ внутри области Ω удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad} u) = -\sigma(x, y, z), \tag{1}$$

где $\sigma(x, y, z)$ – плотность распределения свободных зарядов. Если в области Ω таковые отсутствуют, то уравнение (1) превращается в уравнение Лапласа $\mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad} u) = 0$. На границе $\Gamma = \partial\Omega$ области Ω считаются известными либо значения $u(x, y, z)$

$$u(x, y, z)\big|_{\Gamma} = \mu(x, y, z), \tag{2}$$

либо производная по направлению внешней нормали равна нулю (условия симметрии)

$$\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0 . \qquad (3)$$

Вектор напряженности поля $\vec{E}$ определяется через потенциал u по формуле $\vec{E} = -\mathrm{grad}\, u$, а вектор электрического смещения $\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}$. На границах раздела разнородных сред выполняются условие непрерывности: $[u] = 0$ и $[(\vec{D}, \vec{n})] = 0$, где квадратными скобками обозначена разность предельных значений слева и справа от границы раздела, а $\vec{n}$ – вектор нормали к ней.

3. Построение дискретной модели

Численное решение сформулированной задачи (1)-(3) в объемной области $\overline{\Omega} = \Omega + \Gamma$ состоит из нескольких этапов:

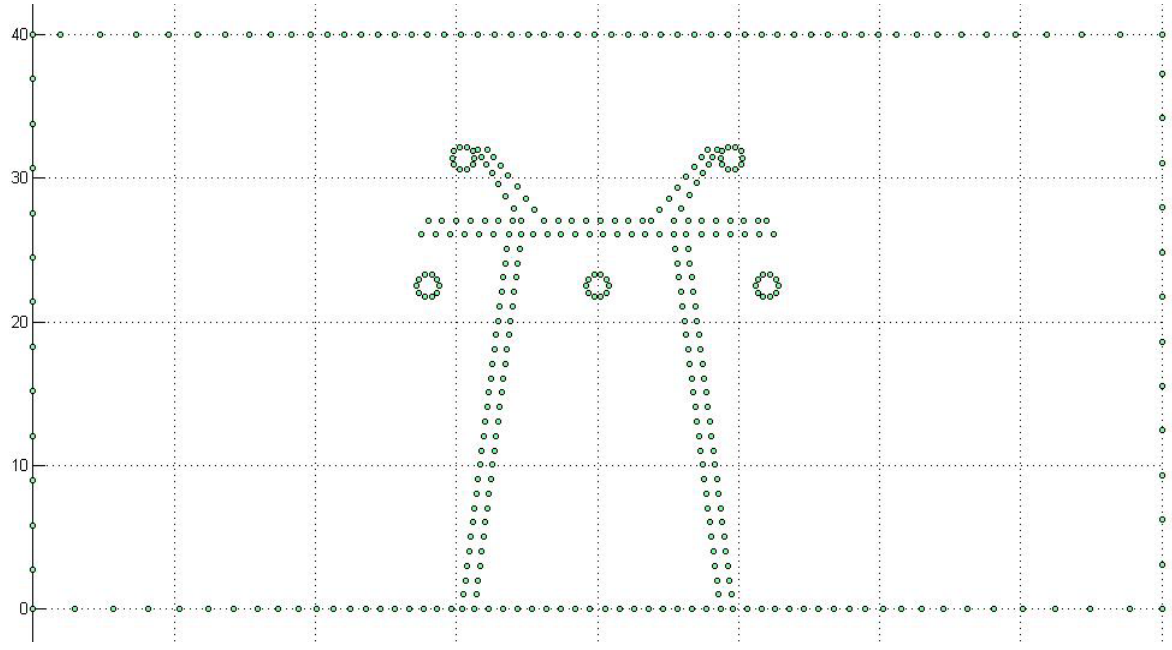
A. Построение дискретной сетки в трехмерной области, окружающей опору.

B. Дискретизация уравнения Лапласа (1) и получение системы линейных алгебраических уравнений.

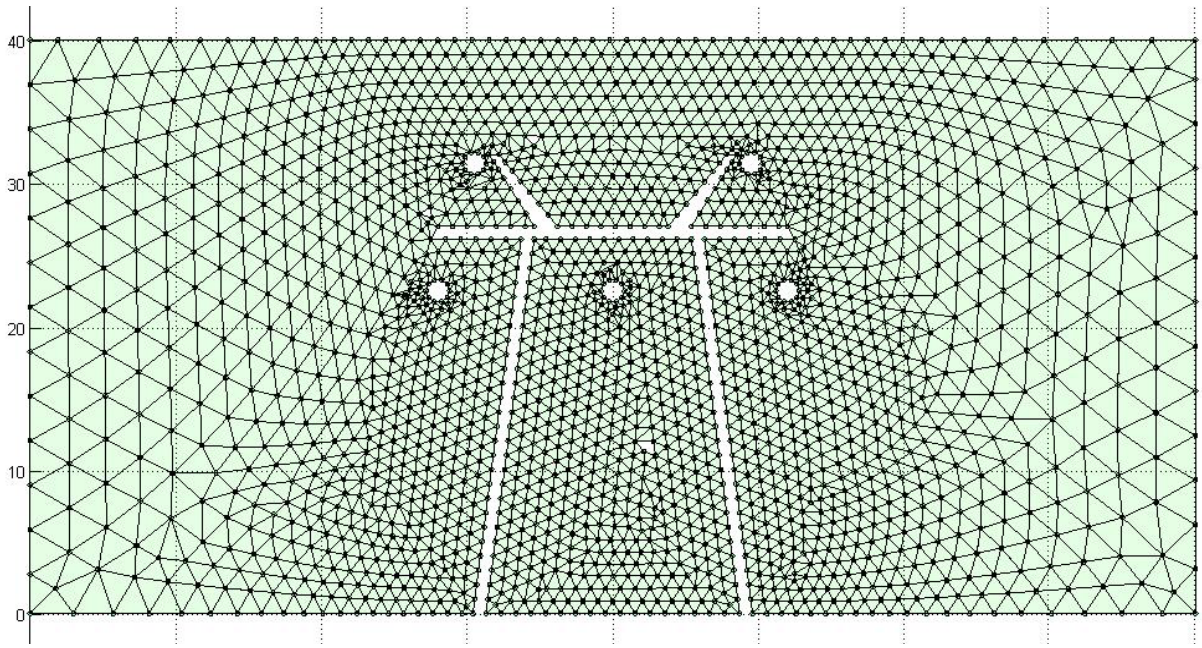
C. Решение системы и получение распределения поля потенциала.

D. Расчет напряженности электрического поля на базе поля потенциала.

Из перечисленных этапов самым сложным является первый. Процесс получения сетки в трехмерном пространстве состоит из нескольких шагов:



a)

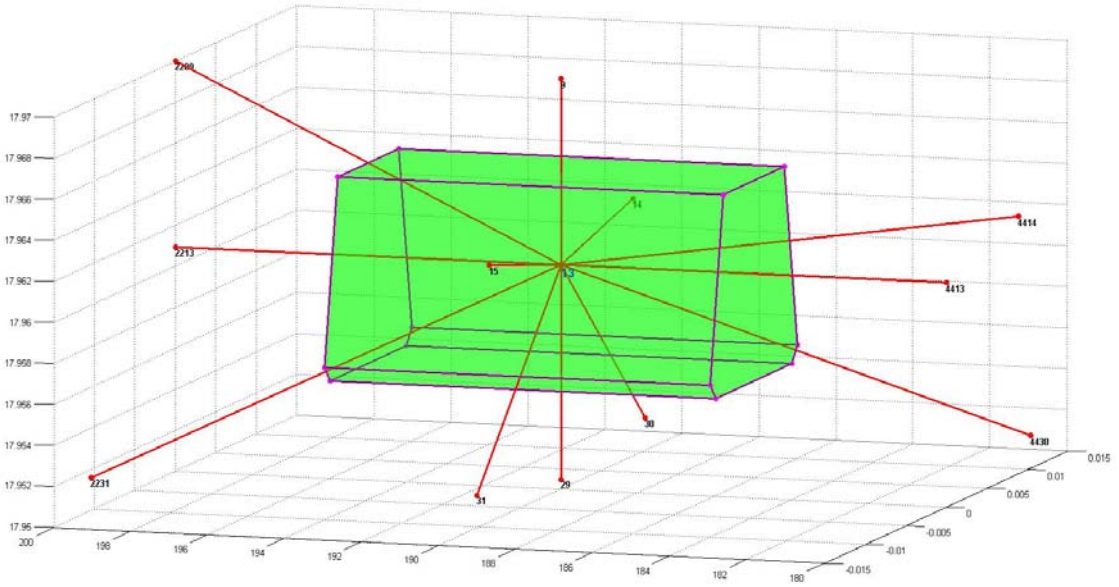


***б*)**

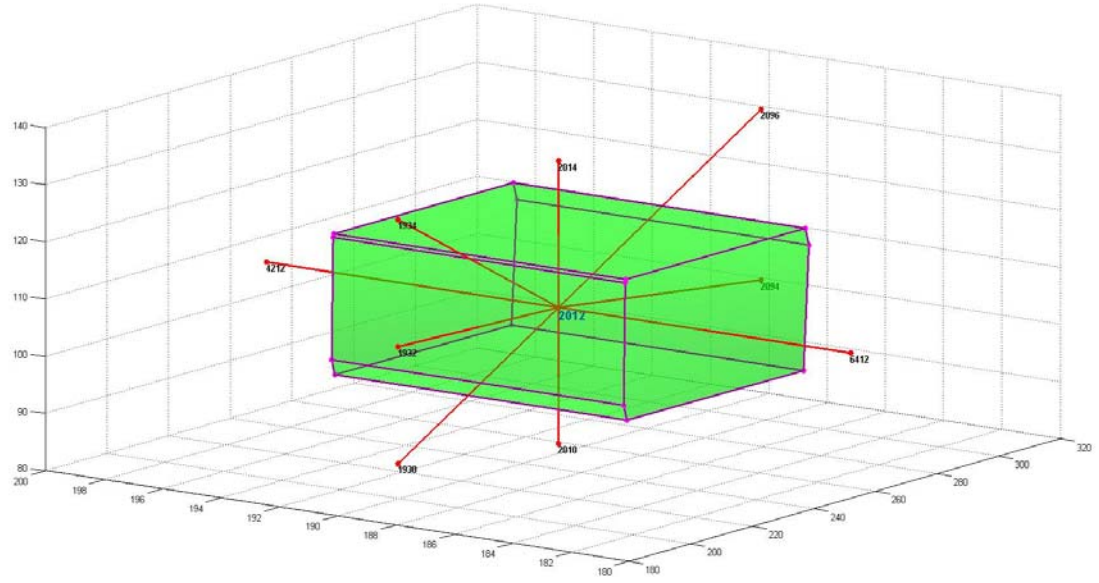
Рис. 2. Сетка в окрестности опоры ***а*)** и триангуляция области ***б*)**

a) В двумерной области, перпендикулярной проводам, строится сетка с использованием фронтального алгоритма (advancing front method) [1, 2]. Рассматриваются две двумерные области: содержащая опору и без опоры (только с проводами). В случае области с опорой задача разбивается еще на две: прямоугольная область в непосредственной близости от опоры и область вдали от опоры без прямоугольника вокруг опоры. После построения сетки в этих двух областях производится объединение двух сеток с исключением общих узлов. На рис. 2 приведено изображение сетки на границе области расчета и триангуляция области, построенная путем применения фронтального алгоритма.
b) Финальная трехмерная сетка собирается из набора плоских двумерных сеток, которые вблизи опоры располагаются на достаточно близком расстоянии друг от друга, а с удалением от опоры расстояние между плоскостями увеличивается
c) Затем средствами Матлаба производится трехмерная триангуляция Делоне и строятся ячейки Вороного, которые используются в дальнейшем для дискретизации уравнения Лапласа.

Трехмерная триангуляция состоит из набора тетраэдров (пирамидок), множество которых обозначим как T_h, где h – максимальная длина всех сторон пирамидок. Введем также дуальную сетку T_h^*, которая состоит из так называемых ячеек Вороного. Каждая ячейка Вороного окружает один из внутренних узлов разностной сетки. На рис. 3 приведены примеры трехмерной ячейки Вороного для базовых узлов с номерами 13 и 2012. Видно, что базовый узел связан с другими узлами сетки, которые называются соседними узлами, а ячейка Вороного представляет собой многогранник с зелеными гранями. Каждая грань ячейки ортогональна отрезку, соединяющему базовый узел с соседним узлом, а точка пересечения грани и отрезка расположена посередине отрезка.



***а*)**



***б*)**

Рис. 3. Ячейки Вороного для базовых узлов с номерами 13 ***а*)** и 2012 ***б*)**, имеющие форму многогранника

Обозначим базовый узел через P_0, а ячейку Вороного через $K^*_{P_0}$. Вершины ячейки Вороного $K^*_{P_0}$ обозначим буквами Q_i, которые являются центрами сфер, описанных около тетраэдров, имеющих в качестве вершины точку P_0.

В качестве приближенного решения задачи (1)-(3) будем рассматривать кусочно-линейную функцию $u_h(x,y,z)$, которая должна быть непрерывной в области $\overline{\Omega}$ и линейной на каждом тетраэдре $K \in T_h$. Такие функции называются линейными сплайнами. На множестве тетраэдров T_h функцию $u_h(x,y,z)$ можно задать следующим образом.

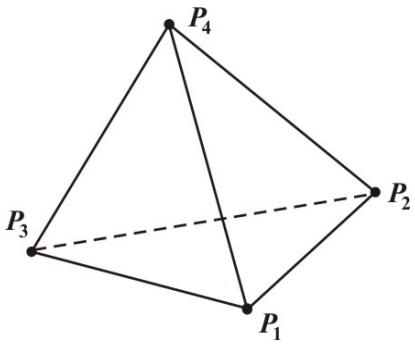


Рис 4. Тетраэдр $K = \overline{P_1P_2P_3P_4}$

Пусть тетраэдр $K = \overline{P_1P_2P_3P_4}$ (рис. 4) является некоторым элементом множества T_h и $P(x, y, z)$ – произвольная точка этого элемента. В этом треугольнике для каждой вершины вводятся функции формы $N_i(x, y),\ i = \overline{1,4}$, которые удовлетворяют условиям: функции формы являются линейными и в вершинах тетраэдра принимают значения 1 или 0: $N_i(P_k) = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$. Функции формы можно представить и в явном виде через координаты вершин треугольника:

$$N_i(x, y, z) = w_{1,i}x + w_{2,i}y + w_{3,i}z + w_{4,i}\,. \tag{4}$$

Здесь $w_{1,i}$, $w_{2,i}, w_{3,i}$ и $w_{4,i}$ являются компонентами векторов $\overline{w}_i, i = \overline{1,4}$. Для определения векторов $\overline{w}_i$ нужно решить 4 системы уравнений $A\overline{w}_i = \bar{f}_i, i = \overline{1,4}$. Коэффициенты матрицы A формируются из координат вершин $P_i = P_i(x_i, y_i, z_i), i = \overline{1,4}$ тетраэдра

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \bar{f}_i = (f_{1,i}, f_{2,i}, f_{3,i}, f_{4,i}),\ f_{k,i} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}.$$

Используя функции формы, для каждого узла (внутреннего и граничного) сетки введем базисную функцию $\varphi_i(x, y, z)$, i = 1, 2, …, n, n+1, …, n_1, где через n и n_1 обозначены соответственно число внутренних и всех узлов сетки. Функция $\varphi_i(x, y, z)$ является кусочно-линейной, т.е. непрерывной и линейной на каждом тетраэдре со значением, равным единице в узле P_i и равным нулю во всех остальных узлах. Тогда приближенное решение $u_h(x, y, z)$ может быть представлено в виде линейной комбинации базисных функций

$$u_h(x, y, z) = \sum_{i=1}^{n_1} u_i \varphi_i(x, y, z)\,. \tag{5}$$

Нетрудно проверить, что коэффициенты u_i в (4) равны искомым значениям потенциала в узле $P_i(x_i, y_i, z_i)$: $u_h(x_i, y_i, z_i) = u_i$.

Здесь следует отметить, что при решении задачи (1)-(3) методом конечных элементов применяется метод Галеркина, который состоит в следующем. Подставим (5) в уравнение (1) и запишем условие ортогональности полученного выражения к базисным функциям $\varphi_k(x, y, z)$ для внутренних узлов сетки

$$\int_\Omega \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad} u_h)\varphi_k dV = -\int_\Omega \sigma\varphi_k dV, \ \ k = \overline{1,n}; \tag{6}$$

$$\int_\Omega \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad}\sum_{i=1}^{n_1} u_i\varphi_i)\varphi_k dV = \sum_{i=1}^{n_1} \alpha_{ki} u_i = \widetilde{\beta}_k; \tag{7}$$

$$\widetilde{\beta}_k = -\int_\Omega \sigma\varphi_k dV; \ \ \alpha_{ki} = \int_\Omega \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad}\varphi_i)\varphi_k dV = -\int_\Omega \varepsilon_a \mathrm{grad}\varphi_i \mathrm{grad}\varphi_k dV.$$

Так как в граничных узлах значения решения известны, система (7) принимает вид

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_{ki} u_i = \beta_k, \ \beta_k = \widetilde{\beta}_k - \sum_{i=n+1}^{n_1} \alpha_{ki}\mu_i, \ \ k = \overline{1,n}. \tag{8}$$

В отличие от метода конечных элементов в методе конечных объемов применяется обобщенный подход Галеркина, который заключается в том, что в условиях ортогональности (6) используются базисные функции $\psi_k(x, y, z)$ пространства $W_2^0(\Omega) = L_2(\Omega)$, определяемого следующим образом. Введем новые базисные функции $\psi_k(x, y, z)$ для дуальной сетки T_h^* по правилу: функция $\psi_k(x, y, z)$ принимает постоянные значения равные единице в ячейке Вороного для внутреннего узла P_k и равна нулю в остальной области, т.е. функции имеют вид кусочно-постоянной функции. Тогда условие ортогональности (6) с функциями $\psi_k(x, y, z)$ принимает вид

$$\int_\Omega \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad} u_h)\psi_k dV = -\int_\Omega \sigma\psi_k dV, \ \ k = \overline{1,n} \tag{9}$$

или в силу того, что функция $\psi_k(x, y, z)$ отлична от нуля только в ячейке Вороного $K_{P_k}^*$

$$\int_{K_{P_k}^*} \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad} u_h) dV = -\int_{K_{P_k}^*} \sigma dV, \tag{10}$$

где $K_{P_k}^*$ – ячейка Вороного для узла P_k.

Поэтому для получения системы линейных алгебраических уравнений для неизвестных значений функции u_h в узлах сетки по методу конечных объемов можно

поступить следующим образом. Рассмотрим в трехмерном пространстве с декартовыми координатами *Oxyz* уравнение Пуассона $\mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad}u) = -\sigma(x,y,z)$ и проинтегрируем это уравнение по объему ячейки $K^*_{P_k}$.

Тогда получим формулу, совпадающую с (10)

$$\int\limits_{K^*_{P_k}} \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad}u)dV = -\int\limits_{K^*_{P_k}} \sigma(x,y,z)\,dV\,. \tag{11}$$

К левой части (11) применим теорему о дивергенции

$$\int\limits_{K^*_{P_k}} \mathrm{div}(\varepsilon_a \mathrm{grad}u)dV = \int\limits_{\partial K^*_{P_k}} \varepsilon_a \mathrm{grad}u\; d\bar{S} = \int\limits_{\partial K^*_{P_k}} \varepsilon_a (\mathrm{grad}u, \bar{n})\,dS = \int\limits_{\partial K^*_{P_k}} \varepsilon_a \frac{\partial u}{\partial n} dS\,, \tag{12}$$

где $\partial K^*_{P_k}$ – полная поверхность многогранника $K^*_{P_k}$; $\bar{n}$ – внешняя нормаль к поверхности $\partial K^*_{P_k}$, а $\partial u / \partial n$ – производная от функции u по этой нормали. В этом случае уравнение (11) принимает вид

$$\int\limits_{\partial K^*_{P_k}} \varepsilon_a \frac{\partial u}{\partial n} dS = -\int\limits_{K^*_{P_k}} \sigma(x,y,z)dV\,. \tag{13}$$

Таким образом, решение задачи (1)-(3) по методу конечных объемов сводится к аппроксимации соотношения (13) для ячеек Вороного внутренних узлов разностной сетки. Аналогичная процедура присуща и методу конечных разностей для сетки с ячейками в форме параллелепипедов, поэтому метод конечных объемов может рассматриваться как обобщение метода конечных разностей для поблочной дискретизации с ячейками произвольной формы. По этой причине метод конечных объемов сохраняет все преимущества метода конечных разностей, а по сравнению с методом конечных элементов более простым оказывается сам алгоритм построения конечно-разностных соотношений и отпадает необходимость в построении локальной и глобальной матриц жесткости для формирования разрешающей системы уравнений типа (8).

Пусть в ячейке Вороного $K^*_{P_0}$ (рис. 3) для базового узла P_0 буквами $P_i, i = \overline{0,8}$ обозначены узлы сетки; $S_i, i = \overline{1,12}$ – площади граней, ортогональных отрезкам $\overline{P_0P_i}$; $M_i, i = \overline{1,12}$ – точки пересечения отрезка $\overline{P_0P_i}$ с гранью S_i. Тогда интеграл по поверхности $\partial K^*_{P_0}$ из формулы (13) аппроксимируем следующим образом:

$$\int\limits_{\partial K^*_{P_0}} \varepsilon_a \frac{\partial u}{\partial n} dS = \sum_{i=1}^{12} \int\limits_{S_i} \varepsilon_a \frac{\partial u}{\partial n} dS \cong \sum_{i=1}^{12} \varepsilon_a(M_i) \frac{u(P_i) - u(P_0)}{\left|\overline{P_0P_i}\right|} S_i\,,$$

где $\left|\overline{P_0P_i}\right|$ – длина отрезка $\overline{P_0P_i}$.

Интеграл в правой части (12) аппроксимируем по формуле

$$\int\limits_{K^*_{P_0}} \sigma(x,y)dV = \sigma(P_0)V_0\,,$$

где V_0 – объем ячейки Вороного $K^*_{P_0}$. Тогда аппроксимацию уравнения (13) можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^{12} \varepsilon_a(M_i)\frac{u(P_i)-u(P_0)}{\left|\overline{P_0P_i}\right|}S_i = -\sigma(P_0)V_0\,.$$

В окончательном виде уравнение для узла P_0 выглядит так

$$\alpha_0 u(P_0) + \sum_{i=1}^{12}\alpha_i u(P_i) = -\sigma(P_0)V_0\,; \tag{14}$$

$$\alpha_i = \varepsilon_a(M_i)\frac{S_i}{\left|\overline{P_0P_i}\right|},\ i=\overline{1,12};\ \ \alpha_0 = -\sum_{i=1}^{12}\alpha_i\,.$$

Для каждого внутреннего узла сетки запишем уравнение вида (14), а для граничных узлов, в которых задано значение потенциала, используется условие (2). Граничные узлы, в которых задано условие симметрии, не включаются в систему уравнений (14) и соответствующие значения коэффициентов α_i исключаются из матрицы системы уравнений (14). В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений с симметричной матрицей. Следует отметить, что при решении прикладных задач число уравнений системы исчисляется тысячами или десятками, сотнями тысяч. Однако поскольку каждое уравнение типа (13) содержит всего несколько ненулевых элементов (обычно от 9 до 25), то итоговая матрица получается достаточно разряженной. В реализованном алгоритме в памяти компьютера хранятся только ненулевые значения элементов матрицы. Для решения построенной системы используется итерационный метод сопряженных градиентов, который для задач рассматриваемого типа сходится очень быстро.

Полученное в области $\overline{\Omega}$ решение $u_h(x,y,z)$ позволяет построить поле потока вектора напряженности $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z) = -\operatorname{grad} u$. Обозначим через v поток вектора $\vec{E}$, проходящий через площадку единичной площади, ортогональной вектору $\vec{E}$. Тогда изолинии $u(x,y,z) = \text{const}$ и $v(x,y,z) = \text{const}$ образуют взаимно ортогональные семейства. Функция $v(x,y,z)$ может быть получена путем вычисления следующего контурного интеграла

$$v(x,y) = \int\limits_{(x_0,y_0,z_0)}^{(x,y,z)} \left(E_x dx + E_y dy + E_z dz\right), \tag{15}$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты произвольной фиксированной точки из области Ω, а путь интегрирования расположен внутри нее. В случае многосвязной области путь

интегрирования также не должен пересекать разрезы области, сводящей ее к односвязной структуре.

Емкость *C* между двумя проводящими телами вычисляется по формуле

$$C = \frac{q}{u_1 - u_2}, \tag{16}$$

где $(u_1 - u_2)$ – разность потенциалов этих тел. Заряд q тела, расположенного внутри некоторой трехмерной области *V*, вычисляется в соответствии с теоремой Гаусса как интеграл по поверхности $S = \partial V$ от вектора напряженности $\vec{E}$

$$q = \varepsilon \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\varepsilon \int_S \mathrm{grad} u \cdot d\vec{S} =$$

$$= -\varepsilon \int_S (\mathrm{grad} u \cdot \vec{n}) dS = -\varepsilon \int_S \frac{\partial u}{\partial n} dS . \tag{17}$$

Здесь *S* – произвольная поверхность, содержащая в себе заряженное тело; $\vec{n}$ – вектор внешней нормали к ней; ε – диэлектрическая проницаемость.

4. Практическая реализация

Описанный выше алгоритм был реализован в виде комплекса программ в среде приложения Matlab.

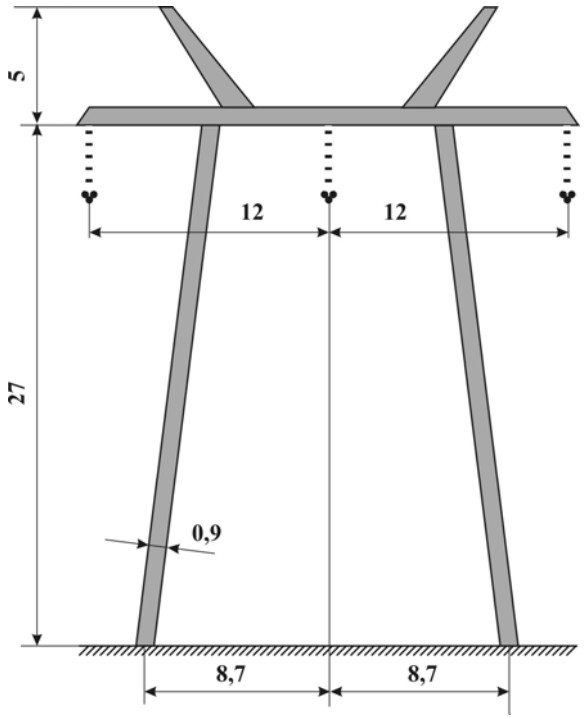


Рис. 5. Опора линии электропередачи

По разработанным алгоритму и программе была решена задача о трехмерном распределении потенциала $u(x, y, z)$ в параллелепипеде $P = \{(x, y, z) : x \in [-L_x, L_x], \ y \in [0, L_y], z \in [0, L_z]\}$ со сторонами длиной L_x = L_z = 160 м, L_y = 200 м. Размеры опоры представлены на рис. 5. Провода 3АС 400/51, r_0=1,13 см, расстояние между составляющими – 40 см, радиус расщепления – 17,3 см. Эквивалентный радиус расщепленной фазы – 10,05 см.

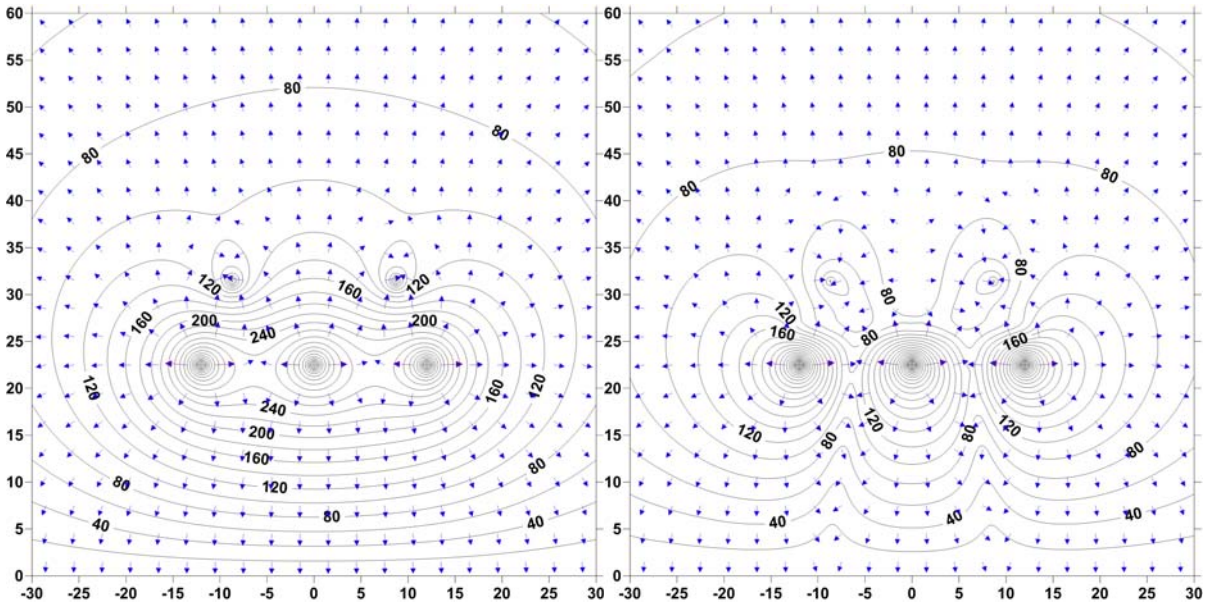
Для оптимизации размера сетки шаги сетки варьировались в больших пределах. На большом расстоянии от опоры и провода шаг равнялся 4 м, с приближением к проводу и опоре шаг уменьшался и в окрестности провода равнялся 0,14 м. Общее количество узлов сетки равнялось 33024. Далее объем области был разбит на 1909507 тетраэдров.

Решение задачи представлено на рисунках 6. На рисунке 6 изображены линии равного потенциала (сплошные линии) и вектор напряженности (стрелки) для различных сечений вертикальными плоскостями при y = 36,23; 1,37; 0,675 и 0 м. Следует отметить, что результаты для y = 36,23 м уже практически не отличаются от результатов при y = 200 м, т.е. на расстоянии 36,23 м от опоры ее влияние на распределение поля потенциала не ощущается. Максимальное значение модуля вектора напряженности электрического поля достигается при y = 0 м в окрестности изоляторов и равняется 264,9 кВ/м. При удалении от опоры значение уменьшается и в сечении y = 36.23 м достигает величины 193,9 кВ/м.

По полученному распределению потенциала по формулам (16), (17) были посчитаны значения погонной емкости провода для различных расстояний от опоры.

$$y = 152{,}4 \text{ м}: \quad C = \begin{pmatrix} 7.27 & 1.80 & 0.61 \\ 1.80 & 7.15 & 1.80 \\ 0.61 & 1.80 & 7.27 \end{pmatrix} \text{ пФ/м}$$

$$y = 0{,}675 \text{ м}: \quad C = \begin{pmatrix} 10.32 & 0.88 & 0.25 \\ 0.88 & 10.39 & 0.88 \\ 0.25 & 0.88 & 10.32 \end{pmatrix} \text{ пФ/м.}$$



y = 36.23 м y = 1.37 м

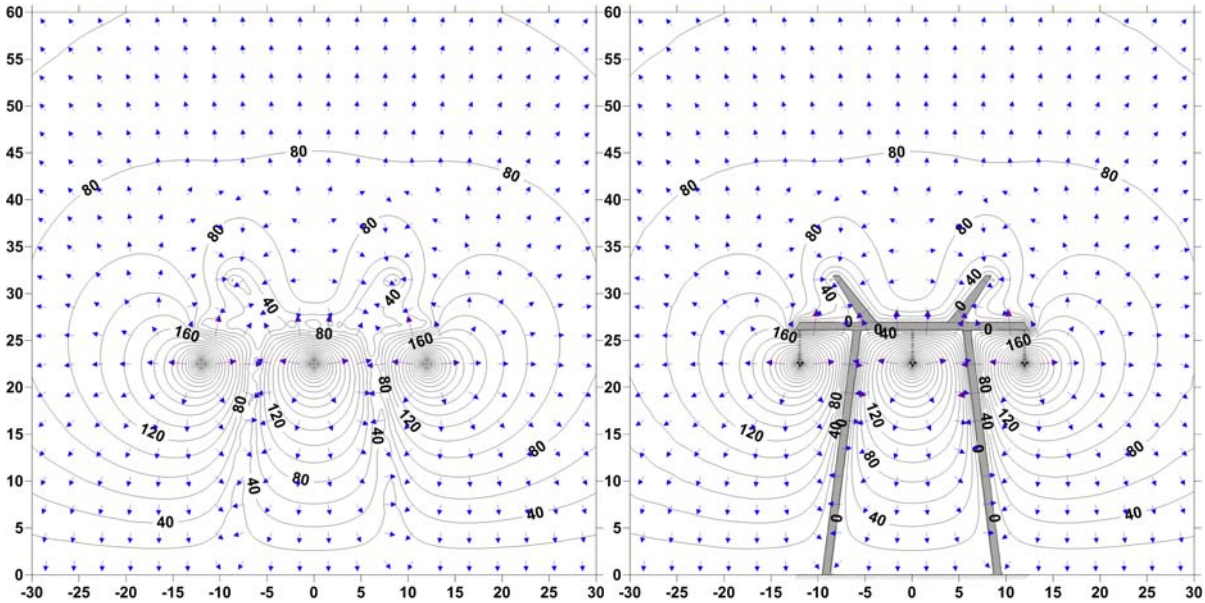


Рис. 6. Линии равного потенциала (черные линии) и вектора напряженности (стрелки) для различных сечений при y = 36,23; 1,37; 0,675 и 0 м

Выводы

1. Решена задача расчета численным методом трехмерного распределения потенциала $u(x, y, z)$ и напряженности электростатического поля в многосвязной области Ω, в которой абсолютная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_a(x, y)$ принимает кусочно-постоянное значение.
2. Предложен алгоритм решения задачи на основе метода конечных объемов. С целью уменьшения объема запоминаемой информации в реализованном алгоритме в памяти компьютера хранятся только ненулевые значения элементов матрицы.
3. Метод конечных объемов сохраняет все преимущества метода конечных разностей, а по сравнению с методом конечных элементов более простым оказывается сам алгоритм построения конечно-разностных соотношений. При этом отпадает необходимость в построении локальной и глобальной матриц жесткости для формирования разрешающей системы уравнений для емкостных коэффициентов.
4. Для решения построенной системы используется итерационный метод сопряженных градиентов, который для задач рассматриваемого типа сходится очень быстро.

Литература

[1] Немировский Ю.В., Пятаев С.Ф. Автоматизированная триангуляция многосвязных областей со сгущением и разрежением узлов. Вычислительные технологии, т. 5, N 2, 2000, с. 82-91

[2] Пашков С.В. Численное моделирование разрушения в динамических задачах механики деформируемого твердого тела (МДТТ). http://ps300.narod.ru/fr3d/mesh.htm

Сведения об авторе

Пацюк В.И. Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики АНМ и доцент Государственого Университета Молдовы. Область научных интересов: численные методы расчета, математическая физика, механика твердого тела, теоретическая электротехника и энергетика. Автор более 100 научных публикаций, в том числе 1 патента и 10 монографий. E-mail: patsiuk@mail.ru

УДК 621.311.24

АЭРАЦИЯ ПРОМЕРЗАЮЩИХ ВОДОЕМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРАТОРА ВОЛНОВОГО ТИПА

Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Соломин Е.Е.
Южно-Уральский государственный университет

Аннотация. В статье описываются технические преимущества и экономические выгоды от использования аэрационных установок на промерзающих кормовых водоемах, получающих энергопитание от возобновляемых источников энергии. Проведена сравнительная оценка метода аэрации с помощью волнового потокообразователя и других методов аэрации водоемов. Приведены показатели и характеристики волнового потокообразователя для аэрации промерзающих водоемов. Проведены расчеты эффективности применения аэрационных установок с использованием устройств на основе возобновляемых источников энергии. В условиях изменяющегося климата и многообразии кормовых водоемов по всему миру, проект может быть масштабирован и распространен на территории СНГ, в странах Европы, США и Канаде.
Ключевые слова: Аэрация, ветроэнергетика, агропромышленный комплекс.

AERAREA LACURILOR ÎNGHEȚATI, FOLOSÂND AERATOARE DE TIP UNDĂ

Solomin E.E., Sirotkin E.A., Solomin E.V.
Universitatea de Stat Ural - Sud

Rezumat. Articol descrie avantajele tehnice şi beneficiile economice de utilizare a instalațiilor de aerare la lacurile, care îngheț în periodă rece a anului. Instalațiile acestea sunt alimentată cu energie electrică de la sursele regenerabile de energie. Este efectuată estimarea comparativă a metodei de aerare prin intermediu al traductorului de flux de tip „unda” şi altor metode de aerare a lacurilor. Sunt prezentate calculele şi caracteristicile a traductorului pentru aerare a lacurilor. Sunt efectuate calculile de eficiență economică a instalațiilor de aerare pe bază a surselor regenerabile de energie. În condițiile a climatului în schimbare şi diversitatea mare a lacurilor, proiectul poate fi răspândit pe teritoriul al CSI, în Europa, SUA şi Canada.
Cuvinte-cheie: Aerarea, energetică eoliană, complex agro-industrial.

AERATION OF THE ICE-COVERED WATER POOLS USING THE WAVE FLOW AERATOR

Solomin E.E, Sirotkin E.A., SolominE.V.
South-Urals State University

Abstract. This article describes the technical advantages and economic benefits of the ice-covered pool aeration plants consuming power from renewable energy sources. We made a comparative evaluation of the wave flow-aeration method and other methods of pool aeration. We showed the indexes and the characteristics of the wave flow-maker for aeration of ice-covered pools on the territory of Russia. We also made calculations of the economic benefits of aeration plants using the devices converting renewable energy. The project can be scaled and extended to the territory of the CIS, Europe, USA and Canada in the changing climate conditions and the variety of feed reservoirs around the world.
Key words: Aeration, wind power, agro-industrial complex.

Введение

Еще несколько десятилетий назад существовало устойчивое мнение, что ресурсы мирового океана неисчерпаемы, а добыча рыбы и морепродуктов подлежит постоянному росту за счет более полного освоения промысловым флотом морских и океанических акваторий. Однако реальная ситуация не подтверждает эти оптимистичные прогнозы. Уже к началу семидесятых годов прошлого столетия наметилось прекращение роста продуктивности мирового рыболовства и за последние сорок лет объемы рыбного промысла существенно не изменились. В связи с этим на сегодняшний день актуальным является развитие рыбоводства.

Производство рыбной продукции по сравнению с другими продуктами, содержащими животные белки, характеризуется высокой эффективностью. Затраты на производство 1 тонны рыбной продукции почти в 5 раз ниже, чем тонны говядины, в 3 раза – свинины, в 8 раз - сливочного масла. Капитальные вложения на производство 1 тонны мяса почти в 4 раза больше, чем на производство 1 тонны рыбной продукции.

Россия, как никакая другая страна в мире, располагает огромным потенциалом для развития рыбоводства. По данным различных источников Российская Федерация располагает от 12 до 16 млн. Га водных площадей внутренних водоемов, пригодных для выращивания рыбы. Потенциальные возможности аква-культурных хозяйств России оцениваются по меньшей мере в 2–3 млн. тонн без учета микро-водоемов с площадями менее 1 Га, не учитываемых официальной статистикой. К примеру, в Китае, где выращивают около 80% всей рыбы в мире, 60% прудовой рыбы выращивается в прудах площадью от 0,01 до 1,0 Га, то есть как раз в таких микро-водоемах.

Главной хозяйственной задачей, решаемой озерным рыбоводством во многих регионах России является производство ценной пищевой рыбы на основе нагульного (пастбищного) выращивания за счет использования естественной кормовой базы. В центральной полосе России промышленное разведение ценных пород рыб должно производиться в устойчивых к промерзанию водоемах с высоким содержанием кормов. Тем не менее, за счет промерзания озер гибнет до 90% рыбы, что приводит к крупным экономическим потерям. С изменением климата и наступлением даже временных похолоданий на территории Европы, США, Канады и других стран такая ситуация не может не привлечь внимание ученых. В связи с этим учеными и аспирантами Южно-Уральского государственного университета в г. Челябинске проведен ряд исследований, направленных на техническое и экономическое усовершенствование аэрации водоемов, перемерзающих в холодное время года, или, так называемых, «заморных» водоемов.

В Челябинской области прочно поддерживаются традиции озерного рыбоводства, ведущие начало от опыта местных каслинских и кыштымских рыбопромышленников, которые весной перевозили десятки тонн живого мелкого окуня, ерша, плотвы из глубоких озер восточного склона Урала в равнинные мелкие, но высоко-кормовые озера зауральской лесостепи. За лето нагула эта рыба увеличивала свою массу в 4–5 раз, обеспечивая осенью и в начале зимы прирост общего улова в среднем в 3 раза. Такая деятельность осуществлялась с 50-х годов XIX века до начала XX века. Образование подавляющего большинства озер Западносибирского пенеплена характеризуется понижением рельефа местности, с толстым слоем глинистой гидроизоляционной подложки, исключающей поступление воды из недр. Питание большинства таких озер исключительно осадочного типа. В связи с этим глубина озер незначительная, в среднем от 1,5 до 3-х метров, площадь таких озер часто бывает значительной, от 1 до 100 Га. Соответственно, для развития планктона создаются исключительно благоприятные условия. Наряду с планктоном бурно развивается водная растительность, которая также является кормовой базой, но при этом

существенно изменяет газовый состав водоемов в течение всего года. Дефицит кислорода, возникающий в ночное время вследствие потребления кислорода водными растениями, а также в зимнее время, когда ледяной покров препятствует диффузии кислорода из воздуха в воду, является одной из основных проблем в рыбоводстве. В Челябинской области в связи с процессами промерзания в водоемах ежегодно гибнут тысячи тонн промысловой рыбы.

Для обеспечения условий жизни и активного питания рыбы необходима технологическая норма растворенного кислорода для форелевых 9,0-11,0г/ $м^3$, для сиговых 12,0-15,0г/ $м^3$. Допустимые значения для форелевых 6,0 г/$м^3$, для сиговых 7,0 г/$м^3$. Оптимальный температурный режим воды считается для форели 14–18^{0}С, для сиговых 18–22^{0}С. Современный потенциал выращивания товарных сеголетков на Урале и Западной Сибири при применении «ускоренных» технологий культивирования товарной пеляди оценивается в 10–12 тыс. тонн в год. Из-за промерзания водоемов количество крупной пеляди обычно составляет не более 10–12% от общего улова этой рыбы, а остальное составляют сеголетки.

Современный уровень исследований данной проблемы характеризуется следующим образом. Различают биологическую, химическую и механическую аэрацию. Из широкого многообразия аэраторов механическая аэрация – наиболее простой и быстрый способ аэрации, заключающийся в применении различных устройств, способствующих насыщению воды кислородом. Этот способ не вызывает побочных отрицательных эффектов в отличие, например, от химической аэрации.

Исследования, проведенные в ряде фермерских хозяйств Челябинской области, показывают, что самый экономичный способ аэрации – волновой. В настоящее время он является самым эффективным по удельной производительности: отношению абсолютной производительности кислорода к его мощности. Она составляет около 5 кг кислорода в час на 0,5 кВт мощности аэратора, что выше, чем у всех известных аналогов. Два часа работы такого аэратора фактически равны баллону чистого технического кислорода (10 кг), стоимость которого составляет 350-400 руб. За сутки экономия 12х380=4560 руб. Или за 150 зимних дней общая экономия 684000 руб. Летняя аэрация составит 20% от зимней аэрации. При этом себестоимость и монтаж аэрационных установок составила всего 180 тыс.руб.

Аэратор волнового типа, представляющий собой две и более параллельных профилированных лопастей с симметричными аэродинамическими профилями типа SRCV-2035, соединенными червячной передачей и/или линейным электродвигателем, предназначен для аэрации как летних, так и зимовальных прудов, в которых он за сезон может размывать майну размером несколько десятков метров. В зимовальном пруду его устанавливают в предварительно проделанную полынью размером не менее 4 квадратных метров. Мощность аэратора составляет не более 0,5 кВт. Производительность по кислороду зависит от площади аэратора и при минимальной комплектации достигает 5 кг O_2 в час.

Принцип действия устройства заключается в следующем: при подаче напряжения на электромагнит волнообразователь погружается в воду и обе лопасти начинают совершать возвратно-поступательные движения по направлению друг к другу, образуя поток, направленный вертикально в толщу воды. При этом также образуются и горизонтальные волны. Площадь поверхности воды, освобожденной ото льда, увеличивается. Ускоряется процесс инвазии (абсорбции кислорода из атмосферы в воду) и концентрация кислорода повышается. В этом случае поверхность водоема не затягивается ледяной коркой.

Однако смысл аэрации заключается не только в увеличении площади воды, контактирующей с атмосферным кислородом, но и в перемешивании внутренних слоев

воды, что приводит к погружению кислорода в нижние части водоема, обеспечивая нормальный уровень pH в придонных объемах. При слишком интенсивном развитии фитопланктона в прудах в безветренную погоду, при отсутствии перемешивания слоев воды может наблюдаться неравномерное вертикальное распределение кислорода (кислородная стратификация). У дна содержание кислорода может быть близко к нулю, а в поверхностном слое – перенасыщенным до 250–300%. Его продолжительность больше суток может приводить к заморам – гибели рыб, обусловленным образованием в придонных слоях вредных продуктов бескислородного разложения органических веществ, таких как сероводород, метан, аммиак. Поэтому применение именно волнового способа аэрации, позволяющего перемешивать слои воды, является наиболее эффективным. Волновой аэратор с потокообразователем может снизить температуру воды в озере до 2^0C, что опасно только теплолюбивым породам рыб. Роду сиговых это понижение не опасно, они хорошо чувствуют себя до 0^0C.

Основной проблемой использования подобных устройств является отсутствие надежной системы энергопитания привода аэратора в связи с тем, что водоемы с требуемой кормовой базой находятся вдалеке от линий электропередач, а средства бесперебойного энергоснабжения в виде дизель-генераторов и систем аккумулирования электроэнергии не могут обеспечить постоянное круглосуточное энергетическое обеспечение такого объекта. Более того, не существует простых и надежных механизмов поддержания открытой полыньи.

С применением новейших технологий в области возобновляемой энергетики эти проблемы могут быть эффективно решены как с технической, так и с экономической точки зрения. Принципиальным для выращивания ценных пород рыб в высоко-кормовых, но, как правило, промерзающих озерах, является совместное использование ветроэнергетической установки (ВЭУ) или гибридного ветро-солнечного энергокомплекса (ГЭК), позволяющего осуществлять полную автономную систему энергоснабжения с наиболее эффективным по удельной производительности волновым способом аэрации. Кроме этого, как будет показано ниже, от ВЭУ/ГЭК может дополнительно осуществляться энергопитание жилого или дежурного объекта рядом с водоемом – обогрев помещения до 6 квадратных метров за счет инфракрасного пленочного электронагревателя со средним энергопотреблением до 20 Вт/м^2, а также освещение на основе двух светодиодных светильников мощностью 30 Вт каждый [1].

Преимущества автономной системы энергопитания

1. Комплекс является полностью автономной системой энергоснабжения, не зависящей от магистрального энергоснабжения, что чрезвычайно актуально из-за удаленности озер отлиний электропередач (ЛЭП).
2. Стоимость проведения ЛЭП в большинстве случаев гораздо выше стоимости ВЭУ. Ориентировочная удельная стоимость в настоящее время ЛЭП составляет около 1 млн. руб. за погонный километр. Более того, ЛЭП нуждается в периодическом обслуживании. С другой стороны, энергокомплекс с выходным напряжением 220В и частотой 50Гц может запитать аэратор мощностью 500 Вт, обеспечивая при этом отопление и освещение мощностью не более 500 Вт и 100 Вт соответственно, создавая достаточно комфортные условия для оператора или обслуживающего водоем персонала [1]. Возможно периодическое подключение различных бытовых электроприборов и электроинструментов.
3. Стоимость электроэнергии в последние годы неукоснительно растет, и этот рост по прогнозам экспертов будет продолжаться [2].
4. Себестоимость электроэнергии, получаемой от дизель-генераторов, в последнее десятилетие сильно выросла из-за дороговизны топлива. Тенденция роста цен на топливо сохраняется.

5. При круглосуточном использовании рабочий ресурс дизельного или бензинового генератора уменьшается до 4–6 месяцев, что обуславливает дополнительный рост себестоимости процесса обеспечения энергопитания [3].
6. Срок эксплуатации ВЭУ и солнечных модулей (СМ) составляет минимум 20 лет, период между недорогими тех.обслуживаниями составляет около 5 лет [2].
7. ВЭУ и СМ просты в обслуживании и обеспечиваются одним работником со средним специальным техническим образованием.
8. Учитывая и используя среднюю скорость ветра в степной и лесостепной зонах 7-8 м/сек, применение ветроэнергетических установок в сочетании с солнечными модулями является самым экономичным способом получения электроэнергии для работы электроприборов. На такой скорости ветра ВЭУ обычно работают в одном из самых эффективных режимов.
9. Использование вертикально-осевых ВЭУ позволяет получать энергию даже при небольшом (до 3 м/с) ветре [3].
10. Энергия является абсолютно экологически чистой: не сжигается органическое топливо, не загрязняется водоем (нет мазутных пятен на воде), система безопасна для птиц, шум и вибрации не превышают норм.

Энергокомплекс помимо ВЭУ и СМ с соответствующими регуляторами мощности должен содержать инвертор с максимально требуемой для данного применения мощностью с целью преобразования энергии к стандартному виду 50Гц 220В. Для периода безветрия и пиковых нагрузок в ночное время желательно установить аккумуляторы соответствующей расчетной емкости в теплом помещении.

Описываемые исследования проведены в фермерском крестьянском хозяйстве Марково-1 в Челябинской области. Хозяйство имеет более чем 200 Га земли, расположенной вокруг озер, находящихся в пользовании. Уже несколько лет хозяйство занимается разведением рыбы семейства лососевых (сиг, пелядь, форель). Кормовая база таких озер позволяет получать навеску 180–240 г (для пеляди) против 90–120 г (для сига) в глубоких горных, но менее богатых кормами водоемов. Посадка форели как эффективного хищника производится для развития более ценного вида рыб на естественных кормах. Так, наличие карася в таких водоемах позволяет форели при посадке весной 200–250 г достигать 1200 г осенью.

Особенность развития этих пород рыб позволяет именно в зимнее время получать значительный прирост массы тела при благоприятном газовом составе воды, в отличие от теплолюбивых рыб, которые во время зимовки худеют. К концу октября рыба набирает 120–140 г (сиг) и 180–240 г (пелядь), но к маю месяцу следующего года вес рыбы достигает 400–500 г, и ее товарная ценность повышается минимум вдвое. В менее кормовых озерах эта навеска достигается только к осени, увеличивая срок роста на 6 месяцев.

Расчет экономических показателей

Приведем ряд экономических расчетов. При выходе 70% от зарыбленного количества по средней расчетной норме посадки в Челябинской области, осенний выход составит с гектара

3000 штук на Га х 70% = 2100 штук х 130 грамм = 273 кг (1)

Весенний выход составит с гектара

1890 штук (2100 х 10% зимний отход рыбы) х 400грамм = 756 кг (2)

Соответственно

273 кг х 40 руб. = 10920 руб. с Га осенью, (3)

756 кг х 80 руб. = 60480 руб. с Га весной (4)

Примем среднюю площадь озера 25 Га. Наличие кормовой базы позволяет увеличить норму посадки в три раза, до 9000 шт/Га. При аэрации водоема летом и

зимой весенний выход составляет 756кг х 3 х 25 Га = 56700кг. х 80 руб. = 4536000 руб., осенний выход 273 кг х 3 х 25 Га = 20475кг х 40 руб. = 819000 руб.

Таблица 1 Общая сумма расходов проекта (разовые расходы)

Статья расходов	Сумма, руб. ₽
Затраты на «зарыбление»	27000
Фонд заработной платы	280000
Отчисления от ФЗП	29700
Стоимость аэрационных установок и монтажа	180000
Приобретение энергокомплекса и другого оборудования: - ветроэнергетическая установка 3 кВт – 280000 руб. - солнечные модули 1 кВт – 108000 руб. - освещение светодиодное 500 Вт – 15000 руб. - пленочный ИК электронагреватель 500 Вт – 25000 руб.	428000
Транспорт рыбного материала	17000
Хранение рыбного материала	22000
Итого в целом разовые расходы:	983700

Таблица 1 расходов проекта составлена из расчета того, что энергокомплекс, состоящий из ВЭУ и СМ установленной мощностью 3 и 1 кВт соответственно вырабатывает на умеренных ветрах 4-5 м/с электроэнергию в объеме 12 кВт-ч в сутки, что достаточно для энергоснабжения вышеупомянутых электроприборов, включая аэратор.

Таблица 2 реализации проекта и его итоговый доход в течение хода проекта составлена на основе предыдущих вычислений:

Таблица 2 Доход от проекта

Статья доходов	Сумма, руб. ₽
Весенний выход рыбного материала	4536000
Осенний выход рыбного материала	819000
Итого за 1 год:	5355000

Выводы

Промерзающие водоемы с применением аэрации волнового типа являются одним из наиболее экономически выгодных вариантов для организации рыбного хозяйства в связи с наличием хорошей кормовой базы.

Сравнение таблиц показывает, что за 1 год оборудование по аэрации на основе возобновляемых источников энергии окупается пятикратно, следовательно, срок окупаемости составляет менее 2 месяцев.

Литература

[1] Соломин, Е.В. Сопряжение ВЭУ малой мощности с пленочным электронагревателем для обогрева помещений / И.М. Кирпичникова, И.Н. Панасюк, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2009. – Вып.12. – №34. – С.78–81.

[2] Соломин, Е.В. Экономические аспекты внедрения ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Вып.14, 20(196). С.32–36.

[3] Соломин, Е.В. Перспективы использования малых ветроэнергетических установок в агропромышленном комплексе / Е.В. Соломин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва. – 2011. – Вып. 7. С.12–15.

Сведения об авторах

Соломин Евгений Викторович, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук. Область научных интересов – ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии.
Контактный адрес: Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, E-mail: nii-uralmet@mail.ru

Сироткин Евгений Анатольевич, магистрант кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, бакалавр техники и технологии, область научных интересов – возобновляемые источники энергии, электротехника, ветроэнергетика, аэродинамика, машиностроение.
Контактный адрес: Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, E-mail ea.sirotkin@gmail.com

Соломин Евгений Евгеньевич, аспирант кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, область научных интересов – возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, солнечная энергетика.
Контактный адрес: Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, E-mail JohnnyS2007@mail.ru

ЭНЕРГОАУДИТ КАК ИНСТРУМЕНТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

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

Аннотация. В работе представлены результаты энергоаудита, проведенного на семи объектах в 2013 году сотрудниками Института Энергетики АНМ, которые являются авторизированными в электро- и теплоэнергетике. Четыре энергоаудита относятся к анализу эффективности энергопотребления в зданиях, три к энергообследованию систем уличного и внешнего освещения. Для каждой организации были выявлены основные проблемы, которые ведут к повышенным потреблениям энергии и были предложены различные меры способствующие снижению энергозатрат, а также снижению выбросов CO_2. Расшифровано понятие энергоаудита, дана характеристика мероприятиям, выполняемым в процессе его проведения. Описано использованное для проведения работ оборудование. Дан анализ характерным проблемам по каждому объекту, а также возможные способы их решения. Определены необходимые инвестиции для внедрения предлагаемых мер по энергоэффективности. Оценен экономический эффект и срок окупаемости как для каждого объекта, так и по всем объектам в целом.

Ключевые слова: Энергоаудит, мероприятия по энергоэффективности, потребление энергии, выбросы CO_2.

AUDITUL ENERGETIC CA INSTRUMENT DE REDUCERE A CONSUMULUI DE ENERGIE

Tîrşu M., Zaiţev D., Golub I.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat: Lucrarea dată prezintă rezultatele obţinute în urma realizării auditului energetic la şapte organizaţii publice în 2013 de către colaboratorii Institutului de energetică al AŞM, care sunt autorizaţi în domeniul electroenergetic şi termoenergetic. Patru audituri energetice au ţinut de eficientizarea consumului de energie în clădiri, două de eficientizarea sistemului de iluminare publică şi unul de eficientizarea sistemului de iluminare pe teritoriul organizaţiei. Pentru fiecare organizaţie au fost scoase în evidenţă problemele majore care conduc la un consum mărit de energie şi au fost propuse mai multe măsuri, ce contribuie la diminuarea consumului de energie şi reducerea emisiilor de CO2. Totodată, se descrie metodele utilizate pentru efectuarea măsurătorilor, precum şi echipamentul utilizat. Se prezintă problemele caracteristice tipizate după categoria obiectului şi modul de depăşire a acestora. Sunt determinate consumurile de energie după scenariul de bază şi consumul de energie în urma implementării măsurilor propuse. De asemenea, sunt prezentate sursele necesare de investit, rezultatele obţinute în urma investiţiei şi perioadele de recuperare a investiţiilor pentru fiecare obiect în parte, precum şi per ansamblu.

Cuvinte-cheie: Audit energetic, măsuri de eficientizare, consum de energie, emisii CO2.

ENERGY AUDIT AS TOOL FOR DECREASING OF ENERGY CONSUMPTION

Tirshu M., Zaitsev D., Golub I.
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper presents results of the energy audit for seven public organizations. Audits were performed in 2013 by the staff of the Institute of Power Engineering of the ASM. The staff is authorized in the field of electricity and thermal energy. Four energy audits were for energy efficiency in buildings; two energy audits were for efficient public lighting system and one for efficient lighting system within the organization. For each organization were highlighted major problems which lead to increased energy consumption and proposed several measures that help reduce energy consumption and reduce CO2 emissions. Also describes methods for the measurements and the equipment used. It presents characteristic problems typified by object class and how to overcome them. Energy consumption is determined for both - baseline energy consumption and after implementing the proposed measures. Also, the necessary investments, the results obtained after investments and the payback periods for each proposed measures as well as a whole are presented.

Keywords: Energy audit, efficiency measures, energy consumption, CO2 emissions.

Введение

В настоящее время экономика Молдовы зависит от импорта энергетических ресурсов, а ее энергоемкость превышает втрое этот же показатель развитых стран.
Закупки энергии требуют больших затрат и существенно влияют на конкурентоспособность местных услуг и продукции. С учетом этого, важной задачей является достижение целей по снижению энергозатрат, повышению энергоэффективности [1,2]. В основе решения задачи энергосбережения важную роль занимает проведение своевременного, профессионального энергетического обследования объекта - **энергоаудита** [3-7]. К целям энергоаудита можно отнести:

- Выявление источников нерациональных энергозатрат и неоправданных потерь энергии;
- Определение показателей энергетической эффективности;
- Определение потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;
- Разработка целевой, комплексной программы энергосбережения.

Проведение энергоаудита, как правило, включает в себя:

- Анализ состояния систем электроснабжения, теплоснабжения, водообеспечения, объекта;
- Оценку состояния систем и средств учета энергоносителей и их соответствие установленным требованиям;
- Выявление необоснованных потерь;
- Проверку энергетических балансов объекта;
- Оценку целесообразности предлагаемых энергосберегающих мероприятий, реализуемых на объекте;
- Энергомониторинг – отслеживание установленных и фактических параметров энергопотребления;
- Измерения – определение с помощью специальных приборов (средств измерения, средств учета) параметров в контрольных точках;
- Опросы и анкетирование участников процесса производства или потребления энергоресурса;
- Изучение сопутствующей нормативной базы, руководящих документов и инструкций на предприятии;
- Расчеты экономической эффективности внедрения тех или иных организационных предложений, либо инвестиций в энергосберегающие технологии (устройства);
- Составление отчета, содержащего результаты проведенного энергоаудита и рекомендации.

Таким образом, энергетический аудит позволяет получить объективные данные о состоянии расходования топливно-энергетических ресурсов предприятием, определить показатели энергетической эффективности и выявить потенциал энергосбережения, а также разработать мероприятия по повышению энергетической эффективности.

На территории Республики Молдова деятельность по проведению энергоаудита регламентируется законом [8]**.**

Принятый закон предполагает формирование в республике необходимых предпосылок для повышения эффективности потребления энергии и снижение потерь, для расширенного использования потенциала возобновляемых источников, развития генерирующих мощностей. Документ предусматривает разработку экономическими агентами и местными органами управления программ по повышению энергоэффективности, включая требования по стандартизации, сертификации,

метрологии, деятельность по энергоаудиту, государственную экспертизу в названной сфере.

Таким образом, энергоаудит является необходимым инструментом для предприятий, которые хотят снизить уровень энергетических затрат и повысить свою конкурентоспособность. В данной статье представлены результаты проведенных энергоадутов на семи предприятиях сотрудниками Института Энергетики Академии наук Молдовы.

Институт Энергетики Академии Наук является авторизированным юридическим лицом в области энергоаудита, деятельность которого подтверждена лицензией, выданной Агентством по Энергоэффективности Республики Молдова.

В состав аудиторской группы ИЭ АНМ входят 8 сотрудников, имеющих авторизации в области тепло- и электроэнергетики. Энергоаудиторы прошли необходимый курс обучения, необходимый для работы в данной области, а также принимают участие в тренингах по тематике энергоаудита, проводимых иностранными экспертами. Полный список аудиторов Института Энергетики можно найти на сайте Агентства по Энергоэффективности (www.aee.md), а также на сайте Института Энергетики (www.ie.asm.md).

Использованное оборудование, описание объектов энергоаудита и характерные проблемы

При проведении замеров в рамках энергоаудитов, использовалось соответствующее оборудование. Под оборудованием понимается комплекс средств измерений, которые должны удовлетворять определенным требованиям к приборам для энергоаудита:

- при измерении режима электрических цепей — отсутствие влияния на работу исследуемых электрических цепей;
- портативность — вес не более 15 кг, исполнение в защищенном корпусе или наличие защитного чехла;
- автономность — наличие встроенного источника питания, обеспечивающего несколько часов работы;
- возможность регистрации данных — наличие внутреннего запоминающего устройства или, в крайнем случае, унифицированного выхода для подключения внешнего запоминающего устройства;
- связь с компьютером — наличие порта и программного обеспечения для передачи данных на ПК;
- наличие действующего свидетельства о калибровке или свидетельства о поверке.

В процессе выполнения работ по энергообследованию авторами применялись измерительные приборы и оборудование, (таблица 1).

Таблица 1 Измерительные приборы и оборудование

	Портативный анализатор газов

Анализатор качества электроэнергии TES3600

Анемометр ATE-1080

Пирометр ATE-2509

Тепловизор Fluke-TiR29

Люксметр ATE-1537

Измеритель влажности ATT-5010

Энергоаудит проводился по двум направлениям: наружное освещение (3 объекта) и здания образовательных учреждений (школы, детские сады и т.д.) - 4 объекта.

При обследовании предприятий был выявлен ряд характерных проблем, связанных с нерациональным расходованием энергетических ресурсов (таблица 2).

Таблица 2 Характерные проблемы при проведении энергоаудита

	Неудовлетворительная теплоизоляция внешних стен
	Негодное состояние внешних дверей и окон
	Плохое состояние кровли
	Использование низкоэффективных осветительных приборов
	Использование малоэффективных систем отопления

По результатам энергоаудитов, выполненных авторами статьи, предложены различные мероприятия по снижению энергозатрат. Среди предложенных мер: использование современных технологий освещения, изоляция внешних стен, автоматизированные системы отопления, использование возобновляемых источников энергии, применение новых изоляционных материалов с малым коэффициентом теплопроводности, установка высококачественных окон, дверей и др.

Как показали расчеты, реализация предложенных мер может привести к существенной экономии. Информация об обследуемых предприятиях, предлагаемых, в результате аудита, мероприятиях по энергоэффективности для каждого объекта, данные об инвестициях, достигаемой годовой экономии и сроке окупаемости представлена в таблице 3.

Таблица 3. Объекты энергоаудита, мероприятия, затраты.

Фото объекта	Наименование объекта	Предлагаемые мероприятия	**Затраты, тыс. лей** **Экономия, тыс. лей/год** **Срок окупаемости лет**
	с. Башкалия, детский сад	1.утепление стен, 2.замена окон и дверей, 3.замена кровли, 4.замена освещения.	1541,8 391,9 3,5
	с. Иордановка, гимназия	1.утепление стен, 2.замена окон и дверей, 3.замена освещения.	749 265,3 3
	с. Карабетовка, уличное освещение	1.замена уличного освещения.	830,26 268,93 3,3
	с. Исерлия, детский сад	1.утепление стен, 2.замена окон и дверей, 3.замена кровли, 4.замена освещения. 5.замена системы отопления	724,3 125,9 5,7
	с. Зайкань, лицей	1.утепление стен, 2.замена окон и дверей, 3.замена кровли, 4.замена освещения.	2628,0 481,6 5,3
	г. Оргеев, уличное освещение больницы	1.замена уличного освещения.	558,1 79,1 5
	пгт. Дрокия, уличное освещение	1.замена уличного освещения.	2156,2 632,2 4
ВСЕГО			9187,66 2244,93 4,25

Заключение

В результате проведения серии энергоаудитов был разработан эффективный комплекс мероприятий по уменьшению энергозатрат и сокращению потерь. Реализация проектов подразумевает инвестирование 9187 тыс. лей и приводит к ежегодной экономии денежных средств, в размере 2244,9 тыс. лей. Использование рекомендаций по осуществлению мероприятий и технологий энергосбережения позволит окупить затраты в пределах регламентируемого срока.

Литература

[1] Национальный план действий в области энергоэффективности на 2013-2015 годы Утвержден Постановлением Правительства №113 от 7 февраля 2013 г.
[2] HOTĂRÎRE Nr. 833 din 10.11.2011 cu privire la Programul național pentru eficiență energetică 2011-2020 Publicat :18.11.2011 în Monitorul Oficial Nr. 197-202 art Nr 914
[3] Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ"
[4] Zero touch energy audit: Will it change the game, www.RealEnergyWriters.com
[5] Energy conservation through energy audit, 1Swati Khare, 2Abhay Kumar Sharma 3R. K. Ranjan 4Shashank Khare International Journal of Current Research Vol. 4, Issue, 09, pp.144-148, September, 2012
[6] Energy audit: a case study to reduce lighting cost., Malkiat Singh, Gurpreet Singh, Harmandeep Singh Asian Journal Of Computer Science And Information Technology 2: 5 (2012) 119 – 122. http://www.innovativejournal.in/index.php/ajcsit
[7] Energy audit practices in China: National and local experiences and issues, Bo Shen Lynn Price, Hongyou Lu. Energy Policy July 2012, Pages 346–358
[8] Закон № 142 от 02.07.2010 (Lege Nr. 142 din 02.07.2010 cu privire la eficiența energetică)

Сведения об авторах:

Тыршу Михаил Степанович 27.02.1972. Окончил Технический университет Молдовы в 1994 году. По специальности «Автоматизация и управление техническими системами». В 2003 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук. Является заместителем директора Института Энергетики Академии Наук Молдовы. Основные исследования проводит в области управления транспортными сетями, диагностики высоковольтного оборудования, силовой электроники и др.

Зайцев Дмитрий Александрович 10.04.1963. 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. Является заведующим «Лабораторией Энергетического Оборудования и Силовой Электроники»..

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.

INSTALAȚIE PENTRU SUDARE CU INFLUENȚĂ REDUSĂ ASUPRA REȚELEI

Tîrşu M.S, Zaiţev D.A., Uzun M.N.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În lucrarea dată se propune o nouă soluție tehnică de realizare a aparatelor de sudat cu arc electric. Aparatele de sudat cu arc electric existente în prezent au o influență semnificativă asupra consumatorilor aflați în zona punctului de conectare a acestuia. Această influență este cu atât mai mare, cu cât lungime fiderului creşte. Dacă aparatul de sudat este conectat la capătul fiderului, atunci consumatorii aflați în zonă sunt afectați grav şi deseori are loc ieşirea din funcțiune a aparatelor de uz casnic. Soluția tehnică propusă se bazează pe ideea utilizării unui acumulator în calitate de tampon. Acest acumulator se calculează în aşa mod ca capacitatea lui să poată acoperi fluctuațiile de curent, ce apar în timpul funcționării aparatului. Totodată, în soluția tehnică propusă se mai utilizează un element inovativ – sursa impulsulară de curent. Inovația acestui element constă în regimul special de funcționare, care permite consumul energiei din rețea în mod controlat şi fără variații bruşte.
Cuvinte-cheie: Arc electric, sudare, instalație, sursă impulsulară

WELDING INSTALLATION WITH REDUCED IMPACT ON THE NETWORK

Tirsu M.S., Zaitev D.A., Uzun M.N.
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. This paper offers a new technical solution to implement arc welding installation. Existing electric arc welders have a significant impact on consumers that are connected near the connection point of it. This effect is greater the longer the feeder. If the installation is connected to the end of the feeder, the impact on neighboring consumers is so large that can be damaged appliances. The proposed technical solution is based on the idea of using the battery as a buffer. The battery is designed so that its capacity was sufficient to meet the instantaneous current peaks that occur during operation. Along with this, in the proposed technical solution, an innovative element is a current pulse source. The novelty lies in the special algorithm of this current source. The proposed algorithm allows the power consumption of the network in a controlled manner and without abrupt jumps.
Keywords: Welding, electric arc, installation, pulse current source.

СВАРОЧНЫЙ АППАРАТ СО СНИЖЕННЫМ ВЛИЯНИЕМ НА СЕТЬ

Тыршу М.С., Зайцев Д.А., Узун М.Н.
Институт энергетики Академии Наук Молдовы

Реферат. В статье предлагается новое техническое решение для реализации электродугового сварочного аппарата. Существующие электродуговые сварочные аппараты имеют существенное влияние на потребителей, подключенных вблизи точки его питания. Это влияние тем больше, чем длиннее фидер. Если сварочный аппарат подключен к концу фидера, то влияние на соседние потребители настолько велико, что могут выйти из строя бытовые приборы. Предложенное техническое решение основывается на идее использования аккумулятора в качестве буфера. Данный аккумулятор рассчитывается таким образом, чтобы его емкость была достаточна для покрытия мгновенных всплесков тока, которые появляются во время работы. Наряду с этим, в предложенное техническое решение, инновационным элементом является импульсный источник тока. Новизна состоит в специальном алгоритме работы данного источника тока. Предложенный алгоритм позволяет потребление электроэнергии из сети в контролируемом режиме и без резких скачков.
Ключевые слова: Электрическая дуга, сварка, установка, импульсный источник.

Introducere

Actualmente, aparatele de sudură cu arc electric sunt instalaţii cu o aplicare foarte extinsă. Acestea sunt utilizate preponderent în industrie, construcţie, dar au şi o foarte largă aplicare în gospodăriile proprii. Funcţionarea masivă a aparatelor de sudură conduc la deformarea tensiunii şi curentului din reţea, influenţând negativ asupra echipamentelor electronice de calcul, aparaturii de măsurare, automatizare şi legătură, care sunt sensibile la armonici de frecvenţă înaltă [1]. Există o gamă largă de diversificaţii a aparatelor de sudură cu arc electric [2], pornind de la cele tradiţionale bazate pe transformator şi terminând cu cele bazate pe invertoarele de curent. Indiferent de tipul de realizare a acestora, influenţa asupra reţelei de tensiune este esenţială. Unele influenţează mai pronunţat, iar altele mai slab. Deseori, funcţionarea acestor aparte scoate din funcţiune aparatele de uz casnic. Nivelul perturbaţiilor induse în reţea de ele depinde în mare măsură de locul de conectare. De regulă, nivelul de perturbaţii este mai înalt la conectarea aparatelor de sudură la capătul fiderului. Şi mai resimţite sunt perturbaţiile, dacă puterea fiderului este slabă (transformatorul de forţă este de putere mică şi sarcina este la maximum).

Aparatele de sudură bazate pe invertor au o influenţă mai mică asupra reţelei în comparaţie cu cele tradiţionale bazate pe transformator. Însă, pe lângă avantajele care le au (masă redusă, curent reglabil, funţii de aprindere uşoară a arcului electric, funcţii de evitare a lipirii electrodului etc.) au şi dezavantaje cum ar fi costul înalt, necesitatea de curăţire de praf mai des, teamă de schimbul brusc de temperatură.

Există mai multe încercări de reducere a influenţei aparatelor de sudură asupra calităţii tensiunii. Printre acestea sunt compensatoarele de putere reactivă dirijate, conectarea la tensiune 380V etc. [3]. Pentru depăşirea problemei date în lucrare se propune o soluţie tehnică nouă, care permite reducere substanţială a influenţei aparatelor de sudură asupra calităţii tensiunii de alimentare. Soluţia tehnică propusă a obţinut brevet de invenţie.

Descrierea soluţiei tehnice

La baza realizării soluţiei tehnice propuse au stat 2 prototipuri. Primul este bazat pe o sursă de alimentare fără transformator a aparatului de sudură, ce conţine un generator de tact inelar trifazat, trei comparatoare, element de setare a tensiunii şi alte blocuri [4]. Neajunsul major al acestei instalaţii îl constituie perturbaţiile mari ce se induc în reţeaua de tensiune de către schimbările prin salt a curentului de sudare (aprinderea şi stingerea arcului de sudare). Acest neajuns este legat de faptul, că alimentarea arcului de sudare se face direct de la reţeaua de distribuţie a energiei electrice.

Al doilea prototip prezintă o instalaţie pentru sudură cu arc electric şi contact, ce conţine redresor, invertor de frecvenţă majorată, baterie de acumulatoare şi circuitul de încărcare a acumulatoarelor [5]. Neajunsul acestei instalaţii ţine, de asemenea, de perturbaţii majore asupra reţelei de tensiune cauzate de fluctuaţiile curentului de sudare prin salt (aprinderea şi stingerea arcului electric).

Acest neajuns ține de faptul, că alimentarea instalației de sudare se face 80% direct de la rețeaua de tensiune şi 20% de la bateria de acumulatoare.

Deci, soluția tehnică propusă vine să reducă semnificativ perturbațiile induse în rețeaua de tensiune cauzate de fluctuațiile prin salt a curentului de sudare la aprinderea şi stingerea arcului electric.

Schema bloc a soluției tehnice propuse este prezentată pe fig.1.

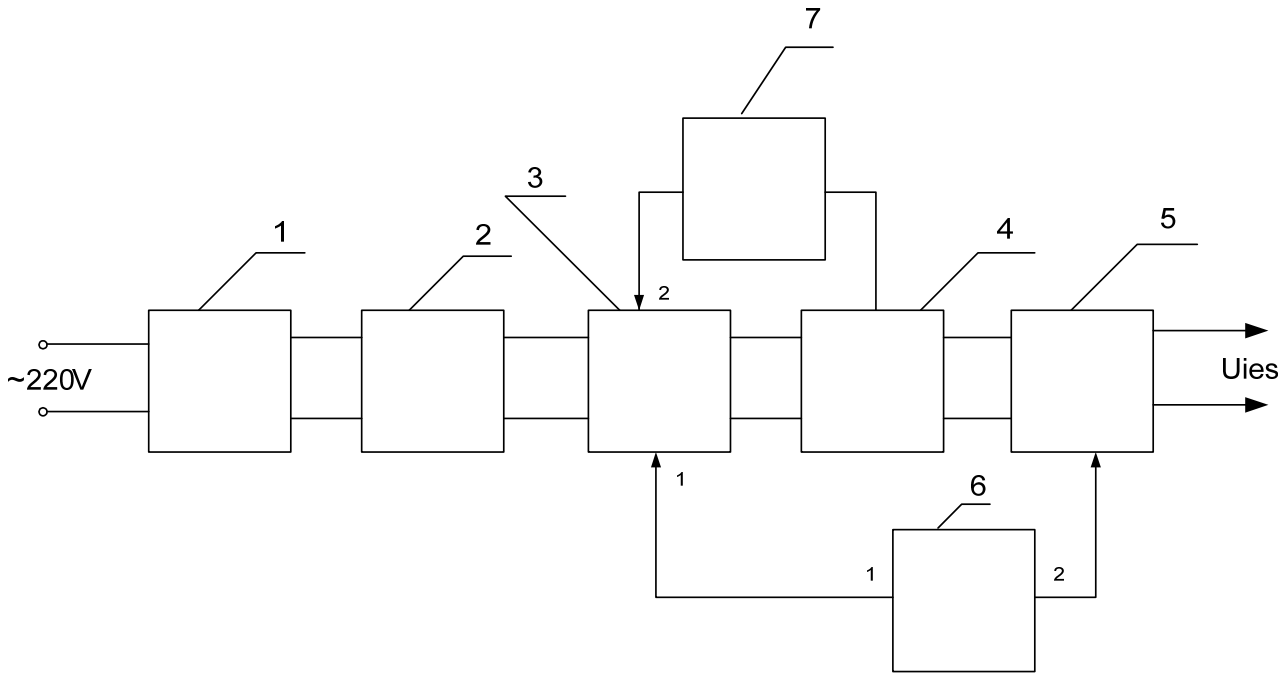


Fig.1. Schema structurală a aparatului de sudat prin arc electric cu impact redus asupra rețelei de tensiune

1 – redresor de tensiune; 2 – filtru; 3 – sursă impulsulară de încărcare; 4 – baterie de acumulatoare; 5 - convertor tensiune; 6 – ajustare curent sudare; 7 – controler încărcare baterie acumulatoare.

Soluția tehnică propusă a aparatului de sudură cu arc electric (fig.1) constă din mai multe module: 1- redresorul de tensiune, care redresează tensiunea de intrare 220V, curent alternativ; 2 – filtru care netezeşte curba de tensiune redresată; 3 – sursa impulsulară de încărcare, care asigură un consum de curent controlabil de la rețea; 4 - baterie de acumulatoare, care funcționează în regim de tampon şi asigură compensarea impulsurilor de curent de frecvență înaltă, ce apar în momentul aprinderii şi stingerii arcului electric; 5 – convertor de tensiune, care converteşte tensiunea bateriei de acumulatoare în tensiunea necesară procesului de sudare; 6 – bloc de ajustare a curentului de sudare, ce permite reglarea curentului de sudare de la minimum la maximum; 7 – controler de încărcare a bateriei de acumulatoare, ce urmăreşte procesul de încărcare a bateriei.

Această combinație de caracteristici asigură alimentarea arcului electric de la bateria de acumulatoare, care se încarcă de la sursa slabă de energie electrică disponibilă. Anume introducerea blocului de ajustare a curentului de sudare şi introducerea controlerului de încărcare a bateriei de acumulatoare, inclusiv acumulatoarele permite asigurarea varierii monotone a valorii curentului consumat în momentul de aprindere şi de stingere a arcului electric.

Descrierea principiului de funcționare

Instalația de sudură cu arc electric bazată pe soluția tehnică propusă funcționează în modul următor.

Tensiunea alternativă 220V, 50Hz se aplică la redresorul 1, după care se aplică la filtrul 2 pentru a obține tensiune continuă. Această tensiune continuă se aplică la sursa impulsulară de încărcare 3, care lucrează după un regim special. Regimul acesta este dependent de curentul de sudare şi capacitatea bateriei de acumulatoare 4 şi este explicat pe fig.2.

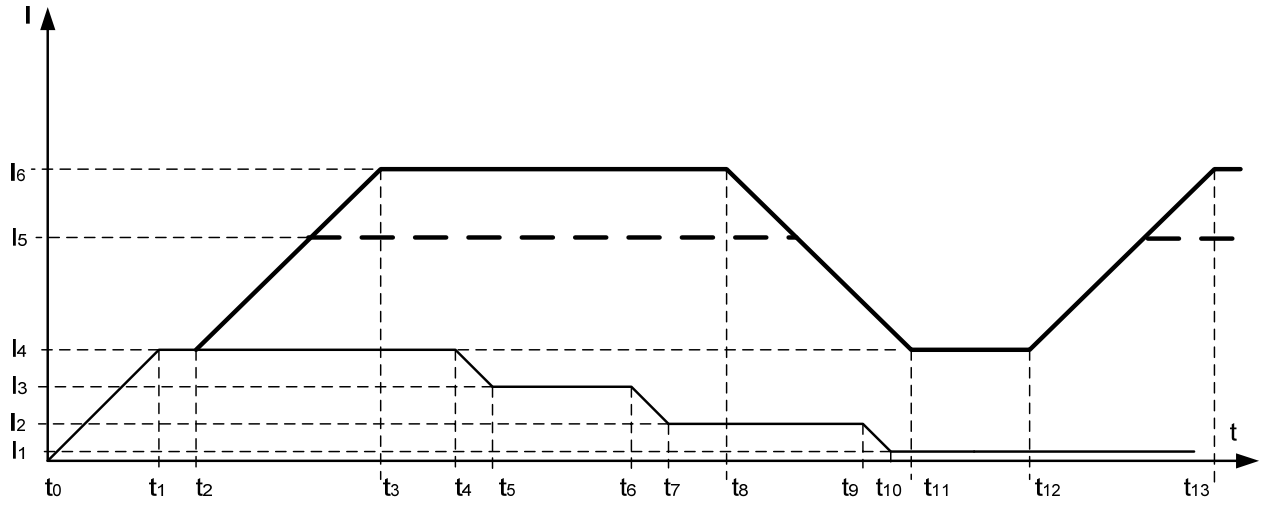


Fig.2. Principiul de funcționare a SIÎ

Deci, la conectarea aparatului de sudură sursa impulsulară de încărcare majorează liniar pe parcursul duratei de timp t_0-t_1 curentul în bateria de acumulatoare până la nivelul I_4. Dacă nu are loc procesul de sudare, atunci curentul I_4, care are valoarea egală cu cea maximă admisibilă de încărcare a acumulatoarelor utilizate, se menține constant până la momentul de timp t_4, când tensiunea pe bateria de acumulatoare devine egală cu cea maximum admisibilă. În intervalul t_4-t_5 are loc descreşterea curentului de încărcare cu 30% față de cel inițial (I_4), care se menține constant (I_3) până când valoarea tensiunii de pe bateria de acumulatoare devine iarăşi egală cu cea maximum admisibilă. În intervalul de timp t_6-t_7 curentul de încărcare se micşorează cu încă cu 30% față de valoarea inițială I_4 şi pe perioada de timp t_7-t_9 se menține constant (I_2) până iarăşi valoarea tensiunii de pe bateria de acumulatoare devine egală cu cea maximum admisibilă. În

intervalul de timp t_9-t_{10} curentul de încărcare se reduce până la valoare I_1, care depinde de parametrii bateriei de acumulatoare. Adică, din momentul t_{10} se va menține deja constantă tensiunea pe bateria de acumulatoare. Valoarea tensiunii va fi egală cu cea maximă admisibilă de încărcare a bateriei de acumulatoare. Curentul I_1 va fi mai mic de 10% din valoarea lui I_4 şi cu timpul va tinde spre zero, ceea ce înseamnă că din momentul t_{10} bateria de acumulatoare se consideră total încărcată. Selectarea curenților I, I_2, I_3 sau I_4 se face cu ajutorul controlerului de încărcare a bateriei de acumulatoare 7. Dacă în momentul de timp t_2 se începe procesul de sudare, atunci sursa impulsulară de încărcare creşte monoton (liniar) curentul în intervalul de timp t_2-t_3 până la o valoare I care are valori cuprinse între $I_5 \leq I \leq I_6$, unde I_5 este curentul corespunzător celui minimal de sudare, iar I_6 este corespunzător curentului maximal de sudare, care se stabileşte de către blocul de ajustare a curentului de sudare 6. Dacă în intervalul de timp t_3-t_8 se întrerupe procesul de sudare pe timp scurt (5-10 secunde), atunci curentul I se menține la valoarea inițială. Dacă pauza durează mai mult de 10 secunde, atunci curentul I în intervalul de timp t_8-t_{11} descreşte până la valoarea I_4 şi repetă în continuare procesul pentru regimul de mers în gol. Dacă în momentul t_{12} reîncepe procesul de sudare curentul I revine la valoarea stabilită şi procesul se repetă. Aceste regimuri descrise au ca scop menținerea unui nivel mediu constant de energie în bateria de acumulatoare. Bateria de acumulatoare serveşte ca compensator a fluctuațiilor de sarcină care au loc în timpul sudării şi mai ales în faza de aprindere şi stingere a arcului electric. Bateria de acumulatoare la rândul său este conectată la un convertor de tensiune 5, care transformă tensiunea de la bornele bateriei de acumulatoare în tensiune continuă de 50V-60V, utilizată, ca regulă, pentru sudarea cu arc electric. Convertorul de tensiune este realizat pe principiul de frecventă înaltă, ce permite reducerea masei şi gabaritelor acestuia, precum şi a instalației în întregime. Totodată, cu ajutorul blocului de ajustare a curentului de sudare se reglează curentul de sarcină al convertorului de tensiune pentru a obține calitatea sudurii solicitate. Capacitatea bateriei de acumulatoare depinde de mai mulți factori: frecvența (intensitate) de sudare (F_S), diferența de sarcină compensată (D_C), diferența curenților I_6-I_4 şi puterea maximă de sudare (P_S). La selectarea acesteia, trebuie luat în calcul posibilitatea asigurării procesului de sudare pe perioade scurte de timp numai de la bateria de acumulatoare. Totodată, trebuie asigurată balanța energiei consumate în timp în procesul de sudare şi cea asigurată de sursa impulsulară de încărcare, cu considerarea tuturor pierderilor lanțului de convertizare P_e (în %). Astfel, energia consumată în procesul de sudare într-o durată t de timp va fi:

$$E=P_S F_S t.$$

Atunci energia totală (E_t) asigurată de SIÎ trebuie să fie:

$$Et=E*P_e/100.$$

În general, cu cât capacitatea bateriei de acumulatoare este mai mare, cu atât fluctuațiile de sarcină de la rețea vor fi mai mici, iar ca rezultat va fi mai mică influența aparatului de sudat cu arc electric asupra rețelei de tensiune.

Concluzii

Soluția tehnică propusă permite reducerea semnificativă a perturbațiilor induse în rețea de către aparatele de sudură cu arc electric în baza includerii în circuitul instalației a bateriei de acumulatoare şi sursei impulsulare de curent, care funcționează după un algoritm specializat.

Bibliografie

[1] Шевцов Александр Александрович. Электрическое сопротивление в сварочном оборудовании и компенсация влияния его неактивных составляющих на эффективность эксплуатации питающей сети. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Тольятти 2000, 152 с. http://www.dissercat.com/content/elektricheskoe-soprotivlenie-v-svarochnom-oborudovanii-i-kompensatsiya-vliyaniya-ego-neaktiv
[2] http://ro.wikipedia.org/wiki/Sudare
[3] Способы подавления гармоник тока в системах электропитания. http://www.tensy.ru/article02.html
[4] Патент РФ №2.371.287, МПК 9 В 23 К 9/00
[5] Патент РФ №2.056.242, МПК 9 В 23 К 11/24

Despre autori:

Tîrşu Mihai Ştefan 27.02.1972. A absolvit Universitatea Tehnică a Moldovei în 1994 la specialitatea „Automatizarea şi comanda în sistemele tehnice”. Din 1994 până în prezent activează la Institutul de Energetică al AŞM. În 2003 susține teza de disertație la grad de doctor în tehnică. În prezent este director adjunct pe probleme de ştiință la IE AŞM. Domeniile principale de activitate sunt în domeniul dirijării cu fluxurile de putere în rețelele de transport a energiei electrice, producerea şi distribuirea energiei electrice, surse regenerabile de energie, electronica de putere, sisteme de conversie a energiei etc.

Zaițev Dmitrii Alexandrovici născut la 10.04.1963. A absolvit Institutul Politehnic din Chişinău (Moldova) în 1985. Susține în 2000 teza de doctor în tehnică în cadrul Institutului de Energetică al AŞM. Domeniul de activitate ține de cercetarea regimurilor de sistem a sistemului electroenergetic, ce include interconexiuni sistemice flexibile. Este şef laborator “Echipament electroenergetic şi electronica de putere”.

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА С ГАЗОВЫМ ПРИВОДОМ, часть II

Шит М.Л., Иойшер А.М., Андронатий Н.Р., Бурчиу В.И., Шит Б.М.
Институт Энергетики АН Молдовы

Аннотация. В статье предложена схема связи теплообменника для утилизации теплоты дымовых газов с испарителем. В предложенной схеме обеспечивается минимум мощности вентилятора для подачи воздуха на испаритель теплового насоса и компенсация пульсаций температуры дымовых газов и напора вентилятора. Показано, как оптимизировать параметры теплообменника из условия минимума диссипации энергии с использованием величины, называемой "энтрансия". Разработана схема координированной системы управления гидравлическими трансмиссиями, передающими мощность на компрессор теплового насоса и электрогенератор.
Ключевые слова: Тепловой насос, газопоршневая установка, диоксид углерода, координированная система управления, регулируемая гидросистема, энтрансия.

ALIMENTARE CU ENERGIE A SEREI INDUSTRIALE CU UTILIZARE A POMPEI DE CĂLDURĂ CU ACȚIONARE DE GAZ , partea II

Şit M.L., Ioişer A.A., Andronati N.R., Burciu V.I., Şit B.M.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. În articol este propusă schema legăturii schimbătorului de căldură pentru utilizarea căldurii gazelor eşapate cu evaporator. În schema propusă se asigură valoarea minimă a puterii ventilatorului pentru transmiterea aerului pe evaporatorul pompei de căldură şi compensarea pulsațiilor temperaturii gazelor eşapate şi presiunii ventilatorului. Este demonstrat cum se poate de optimizat parametrii schimbătorului de căldură din condiția minimului disipării energiei cu utilizarea valorii ce se numeşte entransia. Este elaborată schema sistemului coordonat de dirijare a transmisiilor hidraulice, ce transmit puterea pe compresorul pompei de căldură şi pe generatorul electric.
Cuvinte-cheie: Sistemul de dirijare, dioxid de carbon, pompa de căldură, recuperator de căldură, entransie.

ENERGY SUPPLY OF COMMERTIAL GREENHOUSE WITH THE GAS DRIVEN HEAT PUMP part II

Sit M.L., Ioisher A.A., Andronaty N.R., Burchiu V.I., Sit B.M.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. In this article a scheme of connection of heat exchanger for utilization of heat of flue gases with vapor source is proposed. In proposed scheme is represented minimum power of ventilator for air's feeding on the vapor source of heat pump and compensation of pulsation of temperature of flue gases and pressure of ventilator. It is shown how to optimize parameters of heat exchanger in conditions of minimum of dissipation of energy with utilization of value of entransy. It is elaborated a scheme of coordinated control system of hydraulic transmissions, that transfers power on compressor of heat pump and electrical generator.
Keywords: Heat pump, recuperator, coordinated control system, carbon dioxide, entransy.

Условные обозначения	
T	Температура, *К;*
$\dot{m}$	Массовый расход, *кг/с;*
M_w	Масса 1 м стенки теплообменника, *кг;*
c_w	Теплоемкость стенки, *Дж/кг* ^{o} *С* ;
α_1	Коэффициент теплоотдачи на стороне пластины со стороны холодного потока;
α_2	Коэффициент теплоотдачи на стороне пластины со стороны горячего потока;
F_1	Площадь поверхности со стороны холодного потока, *м*^{2}*;*
F_2	Площадь поверхности со стороны горячего потока, *м*^{2}*;*

R_0	Универсальная газовая постоянная, $R_0 \approx 8{,}314$ кДж/(кмоль·К);
R_g	Индивидуальная газовая постоянная, $R_g = R_0 / M$, M- молярная масса;
$\dot{Q}$	Тепловая мощность, Bm .
Подстрочные индексы	
A	Воздух;
G	Дымовые газы;
H	Горячий воздух;
C	Наружный воздух;
i	Номер секции теплообменника по пути горячего воздуха;
O	Выход потока;
I	Вход потока.

Сокращения	
АИХМ	Адсорбционно-испарительная холодильная машина;
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания;
ГПУ	Газопоршневая установка;
ТН	Тепловой насос;
ТНУ	Теплонасосная установка;
COP	Коэффициент эффективности теплонасосной установки;
САР	Система автоматического регулирования;
ХМ	Холодильная машина.

Введение

Рассмотренная в [1] схема теплового насоса с газовым приводом отличается от [2] и других им подобных тем, что в ней в зимний период теплота, утилизируемая от дымовых газов и от рубашки двигателя, используется для повышения COP теплового насоса с целью увеличения выработки электрической энергии (за счет увеличения COP теплового насоса). В переходный период теплота от газового привода поступает на АИХМ. Если теплоты больше, чем надо, то она удаляется или используется в «малой» адсорбционной ХМ. В этой части статьи рассмотрены: вопросы выбора блока для утилизации теплоты дымовых газов ГПУ, применительно к данной задаче, структура системы управления комплексом.

В последнее время все более очевидны преимущества и перспективы применения *поршневых газовых двигателей* внутреннего сгорания для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Актуальность этого направления обусловлена либерализацией энергетического рынка, высокими затратами на подключение и кризиса в эксплуатации крупных систем централизованного энергоснабжения. В этих условиях реальным путем повышения эффективности энергетического производства является развитие локальных автономных децентрализованных источников комбинированного производства электроэнергии и тепла на базе газопоршневых двигателей, преимуществами которых являются высокий КПД, надежность (http://www.als-energo.ru/catalog/gpu, http://tgi-group.ru/gazoporshnevye-ustanovki, http://www.cogeneration.com.ua/ru/analytics/special-gas/hydrogen-utilization/ , http://www.manbw.ru/analitycs/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html , http://www.ctc-klimat.by/equipment/tec/ , http://tv-k.ru/activities/34-argumenty-v-polzu-primeneniya-mini-tes-na-baze-gazoporshnevykh-dvigatelej.html, http://vk.com/topic-38378501_26560485). Анализ тепловых балансов газопоршневой установки и/или

газового двигателя показывает, что количество теплоты Q_G, теряемой с дымовыми газами, составляет от 22 до 27% общих потерь теплоты ДВС (ГПУ). Теплота, Q_R, которую можно получить от системы охлаждения рубашки двигателя, составляет 10…12% от общих потерь теплоты. Тепловой потенциал Q_G составляет от 1100 до 300^{o}C, а тепловой потенциал Q_R составляет 70…90^{o}C [3]. Для приведения этих тепловых потенциалов к требуемым значениям – 45…50^{o}C необходимо разработать соответствующее техническое решение.

1.1. Система утилизации теплоты

Использование утилизационных теплообменников является классическим решением, применяемым для утилизации теплоты дымовых газов [4-9]. Так, известна система автоматизированного управления утилизацией тепла (САУ УТ) для газопоршневой электростанции с двигателем Perkins 4006TESI, в которой предусмотрена двухконтурная система утилизации тепла: с рубашки двигателя и выхлопных газов ГПУ. Съем тепла с рубашки двигателя осуществляется при помощи пластинчатого теплообменника M10BFM производства Alfa Laval, в котором нагревающим теплоносителем является антифриз двигателя, а нагреваемым - вода. Система утилизации теплоты «Президент-Нева» функционирует по общей схеме работы когенерационной установки по выработке электрической и тепловой энергий: отбор и передача тепла потребителю от систем (контуров) двигателей электростанций с большим температурным потенциалом. К таким контурам относятся: система охлаждения рубашки двигателя и масла и система газовыхлопа. Примерами пластинчатых рекуперационных теплообменников могут быть, следующие, см. http://www.directindustry.com/prod/eclipse/air-air-heat-exchangers-21978-872777.html и http://www.engineeringtoolbox.com/heat-recovery-efficiency-d_201.html. Схему теплобменника, см. http://www.gupex.com/.

Схема утилизационного пластинчатого теплообменника (рис.2) с регулируемым аккумулятором теплоты (рис.1) состоит из четырехсекционного теплообменника, в первой секции которого происходит подогрев наружного воздуха до определенной температуры, а в последующих секциях – охлаждение этого воздуха до заданной температуры, например, 50^{o}C. Особенностью схемы является ее простота, невысокая стоимость, простота системы регулирования температуры на выходе смесителя. Регулирование температуры теплого воздуха в секциях теплообменника производится посредством задвижек, установленных на входах потоков холодного воздуха на входе в каждую секцию. Регулируемый аккумулятор теплоты может представлять собой резервуар с мешалкой, заполненный водой. В резервуаре расположены теплообменники "газ-жидкость". В одном из теплообменников пульсации температуры теплого воздуха, (вызванные пульсациями температуры выхлопных газов и пульсациями напора вентилятора), вызывающих *превышение* заданной температуры воздуха, поступающего на испаритель, *компенсируются* за счет подачи наружного воздуха, а пульсации температуры со значениями *ниже* заданного *компенсируются* за счет горячего воздуха, поступающего от одной из ступеней теплообменника. Т.е., эти два теплообменника служат для стабилизации температуры стенки трубопровода, по которому теплый воздух поступает в испаритель теплового насоса поз.11 (рис. 5). Воздух, предназначенный для стабилизации температуры воды, а, следовательно, и температуры стенки трубопровода теплого воздуха, удаляется наружу. Дымовые газы также уходят в атмосферу (температура газа на выходе определяется условием отсутствия коррозии выхлопной трубы). При существенном изменении температуры

воздуха на входе, температура газа на выходе регулируется расходом газа путем пропуска его через байпас. Фильтрация высокочастотных пульсаций температуры происходит за счет инерционности стенки теплообменника. Так, если вычислив постоянную времени стенки T_W по формуле [10],

$$T_W = M_w c_w / F_1 \alpha_1 \qquad (1)$$

и воспользовавшись известной формулой для амплитудно-частотной характеристики инерционного звена

$$A(w) = \frac{1}{\sqrt{1 + T_w^2 w^2}}, \qquad (2)$$

где w – круговая частота, то можно показать, что, например, при следующих исходных данных: толщина стенки $T_W = 0,0008 м$, теплоемкость стали $c_w = 0,462 кДж / кг\,K$, площадь поверхности 1 м^2 теплообменника $F_1 = 1 м^2$, масса 1 м^2 стенки 63,2Н, коэффициент теплоотдачи от поверхности к воздуху $\alpha_1 = 12\ Дж/(м^2 \cdot с \cdot K)$ частоты колебаний температуры воздуха, начиная с 0,65 *Гц*, практически не будут передаваться через стенку. Колебания температуры воздуха, вызванные нестабильностью напора вентилятора, будут гаситься с помощью соответствующих САР температуры воздуха после каждой секции теплообменника. При выборе количества секций теплообменника критерием является минимум расхода воздуха, подаваемого вентилятором. Так, например, при наличии двух секций (при температуре наружного воздуха) отношение расхода воздуха через секцию холодного воздуха к расходу воздуха через секцию горячего воздуха будет (457-50)/(50-0)~8,14. При пяти секциях и значениях температур отношение расходов воздуха будет равно 5,58, что снизит мощность вентилятора в $(8,14/5,58)^3$=3,0 раза.

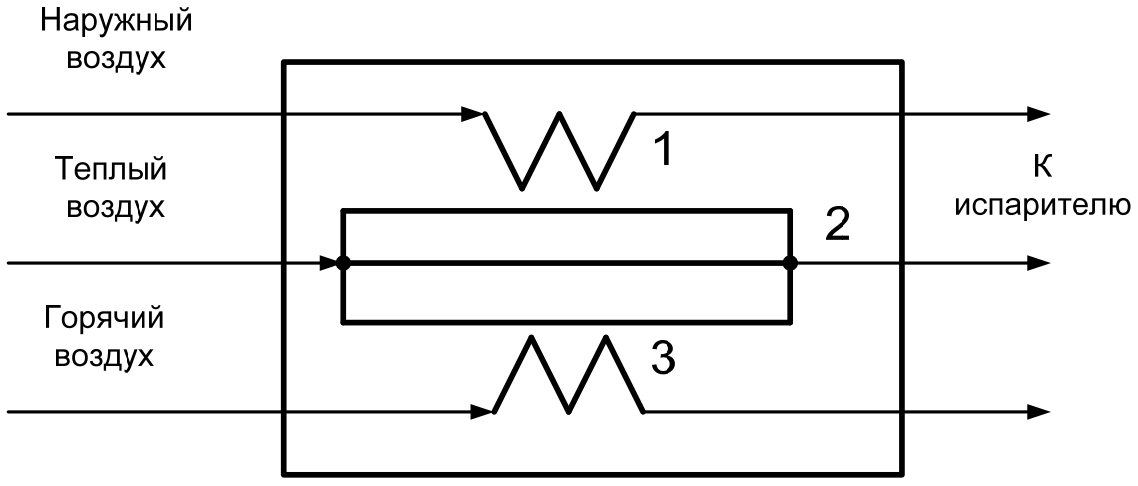


Рис. 1. Схема регулируемого аккумулятора теплоты.
1 – теплообменник охлаждения теплоаккумулирующего вещества, 2 – воздухопровод подогретого воздуха, 3 – теплообменник подогрева теплоаккумулирующего вещества

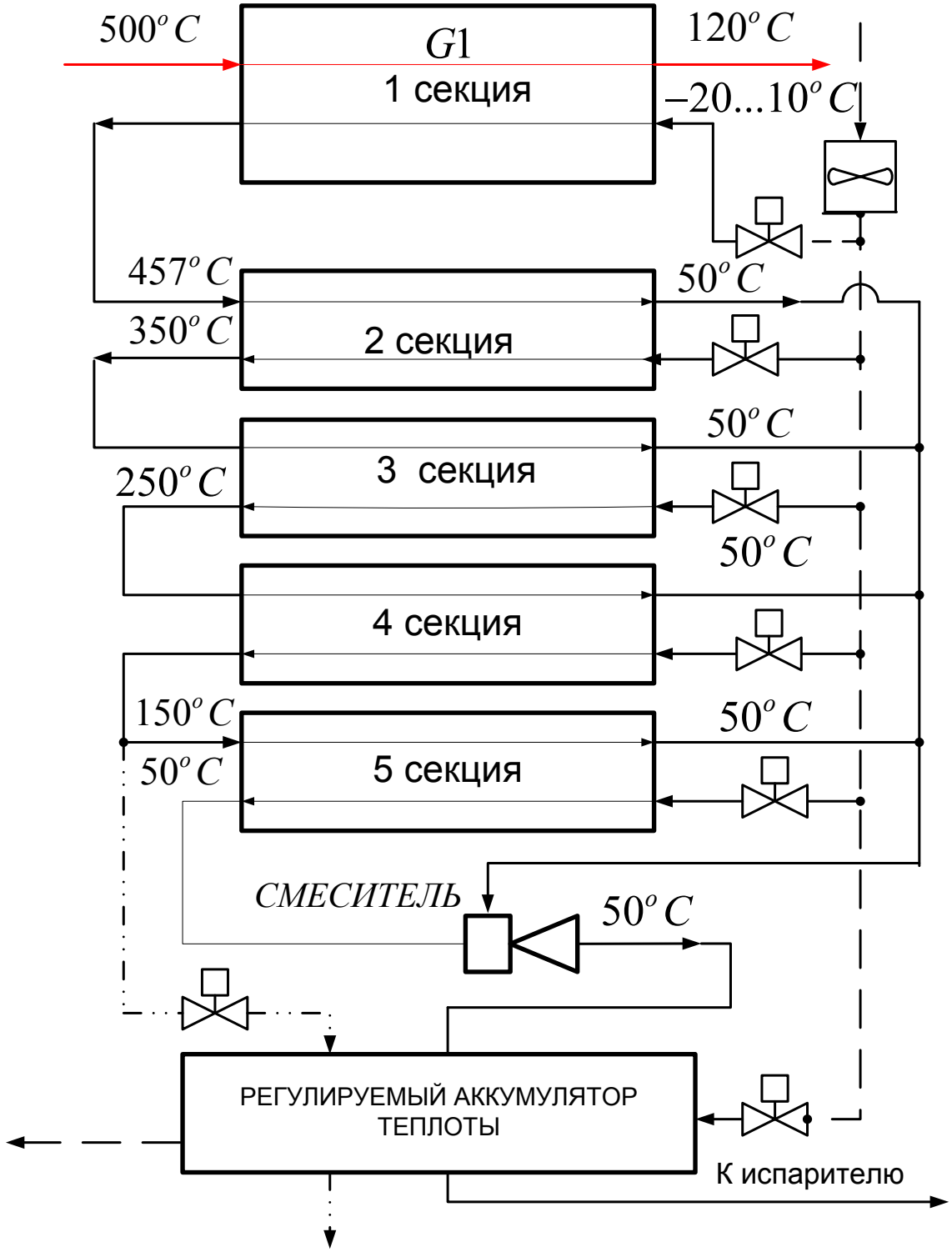


Рис.2. Схема блока утилизационного теплообменника,
линия штрихпунктирная – горячий воздух, линия штриховая – наружный воздух,
сплошная линия – теплый воздух

Термодинамический анализ

Задаче снижения потерь энергии в теплообменнике придается в настоящее время большое значение. Имеются два вида оценки качества теплообменника – с помощью первого и второго законов термодинамики. Подход, использующий минимизацию энтропии, был предложен Бежаном [13,14] при котором анализируются два типа необратимостей в теплообменнике: первая – вызванная теплообменом, и вторая – потерями из-за гидравлических сопротивлений. Гуо и др [15] предложили новое физическое понятие для описания теплопередачи, по аналогии с электропроводимостью, и назвали эту величину *энтрансией* (entransy), как меру необратимости процесса теплообмена, составив это слово из двух (energy, transfer ability). Энтрансия E_{vh}, накопленная в объекте (по аналогии с энергией, накопленной в конденсаторе), определяется по формуле [15]

$$E_{vh} = \frac{1}{2} Q_{vh} U_h = \frac{1}{2} Q_{vh} T,$$

где, $Q_{vh} = Mc_v T -$ тепловая энергия или теплота, сохраненная в объекте постоянного объема, которая может быть названа тепловым зарядом. U или T определяет тепловой потенциал. Было показано, что энтрансия рассеивается в процессах теплообмена, и увеличение диссипации энтрансии влечет увеличение необратимости, и что имеется взаимно-однозначное соответствие между минимумом диссипации энтрансии и максимумом теплопередачи.

Уравнение энергетического баланса первой секции рекуперативного теплообменника имеет вид [12]:

$$\dot{Q} = m_G c_{PG} \left(T_{H,i} - T_{H,o} \right) = m_A c_{PA} \left(T_{A,O} - T_{A,I} \right) \qquad (1)$$

Диссипация энтрансии в этой секции вычисляется по формуле:

$$\dot{G}_{\Delta T} = \frac{1}{2} \left(\dot{m} c_P \right)_G \left(T_{G,i}^2 - T_{G,o}^2 \right) + \frac{1}{2} \left(\dot{m} c_P \right)_A \left(T_{A,i}^2 - T_{A,o}^2 \right) \qquad (2)$$

Для последующих секций теплообменника индексы при формулах (1) и (2) заменяются на AH_I, i, AH_O, i, где $i -$ номер секции, H – означает "горячий воздух, C–"холодный воздух" и общая энтрансия теплообменника будет равна сумме энтрансий секций.

$$\dot{G}_T = \dot{G}_{\Delta T} + \dot{G}_{\Delta P} \qquad (3)$$

Диссипация энтрансии, вызванная трением газов в секции «дымовые газы - воздух» теплообменника выражается формулой (по аналогии с [12])

$$\dot{G}_{\Delta P} = \dot{m}_G \left[\frac{T_{G,O} - T_{G,I}}{\ln \left(T_{G,O} / T_{G,I} \right)} \right]^2 R_{gG} \ln \left(1 - \frac{\Delta P_G}{P_G} \right) - \dot{m}_A \left[\frac{T_{A,O} - T_{A,I}}{\ln \left(T_{A,O} / T_{A,I} \right)} \right]^2 R_{gA} \ln \left(1 - \frac{\Delta P_A}{P_A} \right) \qquad (4)$$

Для последующих секций теплообменника получаем:

$$\dot{G}_{\Delta P_i} = \dot{m}_{AHi}\left[\frac{T_{H(A,O)i} - T_{H(A,I)i}}{\ln\left(T_{H(A,O)i}/T_{C(A,I)i}\right)}\right]^2 R_g \ln\left(1-\frac{\Delta P_H}{P_{H,i}}\right) - \dot{m}_{C(Ai)}\left[\frac{T_{C(A,O)} - T_{C(A,I)}}{\ln\left(T_{C(A,O)}/T_{C(A,I)}\right)}\right]^2 R_g \ln\left(1-\frac{\Delta P_C}{P_{C,i}}\right) \tag{5}$$

$$\dot{G}_i = \dot{G}_{\Delta T_i} + \dot{G}_{\Delta P_i} \tag{6}$$

Безразмерная скорость изменения диссипации энтрансии, которую называют "числом диссипации энтрансии" вычисляется для первой секции рекуператора по формуле

$$G^* = \frac{\dot{G}}{\dot{Q}\cdot\left(T_{H,I} - T_{A,O}\right)}. \tag{7}$$

Эта формула получается путем деления уравнения (7) на $\dot{Q}\cdot\left(T_{G,I)} - T_{A,O}\right)$. Эффективность теплообменника вычисляем по формуле [16]

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1+NTU}. \tag{8}$$

Таким образом, оптимизация конструкции рекуператора для данной задачи сводится к минимизации механической мощности напорного вентилятора при условии ограничения на стоимость теплообменника (которую характеризуем площадью его теплопередающей поверхности) и минимумом диссипации энтрансии.

1.2. Система управления

Структурная схема установки имеет вид (рис.3).

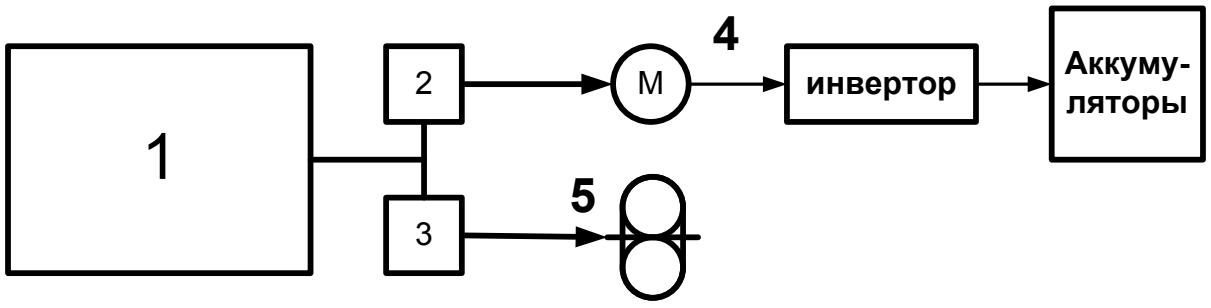


Рис.3. 1- ГПУ, 2, 3 – гидропередачи, в которых регулируется по передаваемый момент и число оборотов выходного вала, 4 – генератор напряжения, 5 – компрессор

Система управления тепловым насосом (рис.4) состоит из шести подсистем: САУ температурно-влажностным режимом; САУ электрогенерацией и электропотреблением; САУ тепловым насосом; САУ тепловым насосом; САУ гидравлическими передачами; САУ газопоршневой установкой.

Система имеет следующие особенности: для получения новой заданной температуры газоохладителя (ГО) и новой мощности, передаваемой через ГО необходимо изменить следующие задания регуляторам контуров САР:

1) задание по мощности компрессора (число оборотов гидропривода, давление в гидросистеме соответствующей гидропередачи);
2) задание по температуре воды после ГО;
3) задание по расходу теплого воздуха через испаритель исходя из условия, чтобы значение величины расхода теплого воздуха соответствовало новой мощности компрессора;

При этом рабочая точка компрессора (давление и температура хладагента на его входе) выходит в заданное положение после завершения переходных процессов в испарителях и дополнительном теплообменнике теплового насоса. Инерционность процесса вывода рабочей точки в заданное положение определяется: инерционностью утилизационных теплообменников, аккумулятора теплоты.

СОР теплового насоса регулируется посредством изменения режима работы промежуточного теплообменника и работы утилизационного теплообменника (рис.3). Второй регулируемой величиной системы является расход газа, задаваемый в зависимости от СОР ТН и максимума КПД ГПУ. При изменении метеоусловий происходит изменение расхода хладагента через теплообменники, поз. 3, 5, 7, 13 рис.3 и расхода дымовых газов на входе в утилизационный теплообменник. Критерием качества управления ГПУ является минимум расхода газа за время переходного процесса.

При изменении задания по изменению мощности компрессора, происходит изменение расхода воздуха, идущего на аккумулятор теплоты и далее на испаритель. В объемных гидропередачах поз. 1 и 2, расположенных между ГПУ (ДВС) и компрессором и генератором (рис.3) изменяется число оборотов гидромоторов, связанных с нагрузками (компрессор и генератор) и давление рабочей жидкости, таким образом, чтобы обеспечить передачу заданной мощности в компрессор при условии, что суммарная передаваемая мощность остается постоянной.

Аккумуляторная батарея, являяется накопителем электрической энергии, генерируемой станцией, и одновременно элементом, согласующим мгновенную мощность нагрузки и генерируемую мощность. Батарея аккумуляторов потребляет только мощность, соответствующую ее зарядному току. Согласовать зарядную мощность батареи аккумуляторов с избытком мощности системы генерации электроэнергии позволяет регулирование количества аккумуляторных батарей а, следовательно, и емкости батареи с помощью соответствующего управляющего устройства, что может быть осуществлено, например, по схеме [11].

Установка генерирует определенное количество электроэнергии при выполнении условий:

а) минимума расхода газа ДВС для производства необходимой теплоты для отопления теплицы при условии;
б) обеспечения максимального СОР ТН;
в) максимального КПД ДВС.

В летнее время газ поступает на теплообменник для выпаривания влаги. Емкость холодильника определяется из возможностей системы утилизации теплоты и максимальной мощности холодильника для наихудших условий.

Основой обеспечения минимума перерасхода топлива при обеспечении заданной тепловой мощности и максимальном КПД системы является координированная система управления мощностью ДВС (ГПУ). В этой системе обеспечивается поддержание суммарной механической мощности расходуемой на привод компрессора и

асинхронного генератора при возмущениях, поступающих от компрессора (изменение задания мощности компрессора).

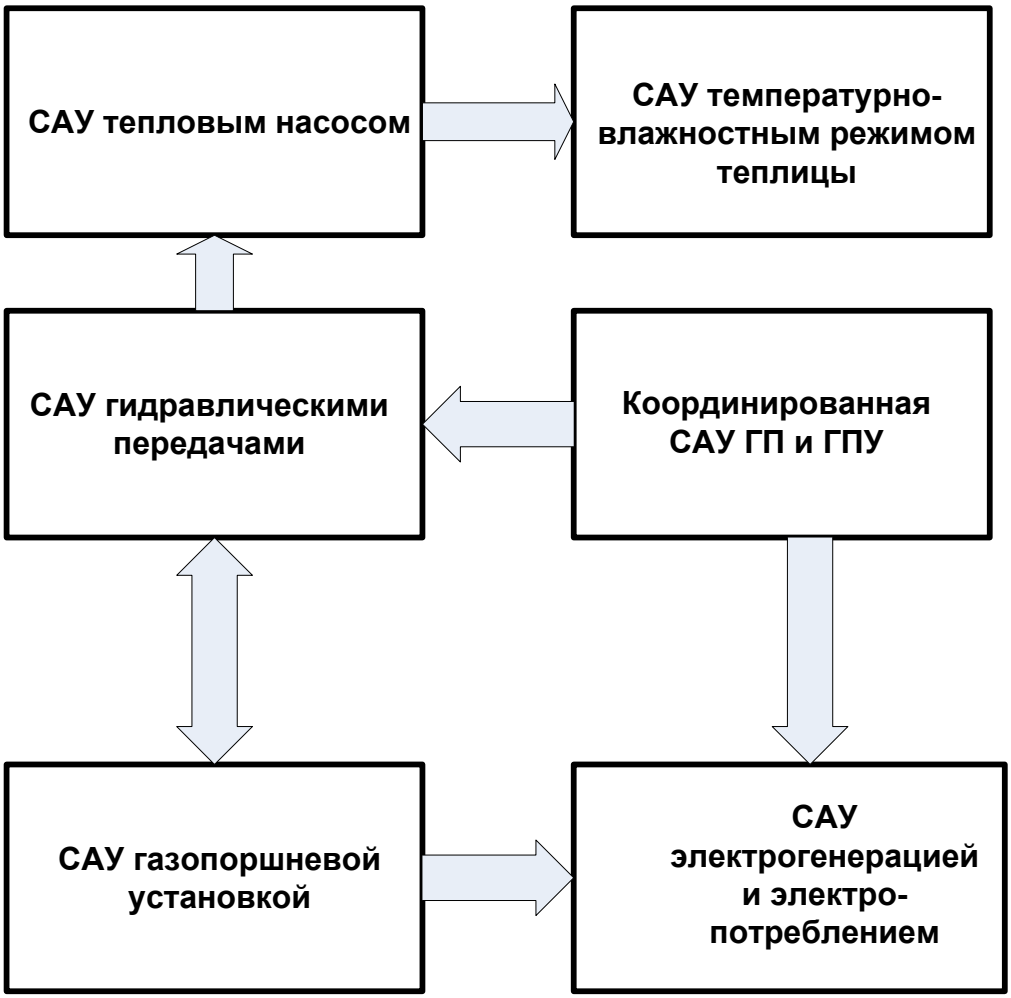


Рис. 4. Структурная схема САУ ТН с ГП

Из изложенного следует, что САУ ГПУ должна иметь систему стабилизации числа оборотов при постоянной мощности в нагрузочном режиме с заданным эффективным КПД. Мощность двигателя расходуется на привод компрессора и привод электрического генератора. Эти составляющие мощности являются случайными величинами, зависящими от электрической нагрузки ГПУ и тепловой нагрузки ТН. Задачей координированной системы управления расходом топлива газового двигателя ГПУ является поддержание стабилизация суммы этих нагрузок при приоритете тепловой нагрузки и при условии минимума перерасхода топлива в переходных процессах. Координированная система управления управляется следующим образом. Пусть на контур управления компрессором ТНУ поступил сигнал задания: увеличить момент на компрессоре и число оборотов компрессора. Тогда, регулятор нагрузки второго гидропривода изменяет свой сигнал таким образом, чтобы сумма мощностей на двух валах осталась неизменной. В координированной системе управления должна быть учтена система стабилизации положения рейки ТНВД (топливного насоса высокого давления), как первый канал координированной системы управления, и второй канал координированной системы управления – канал задания мощности,

передаваемой на компрессор теплового насоса. На рис.5 приведена схема теплового насоса.

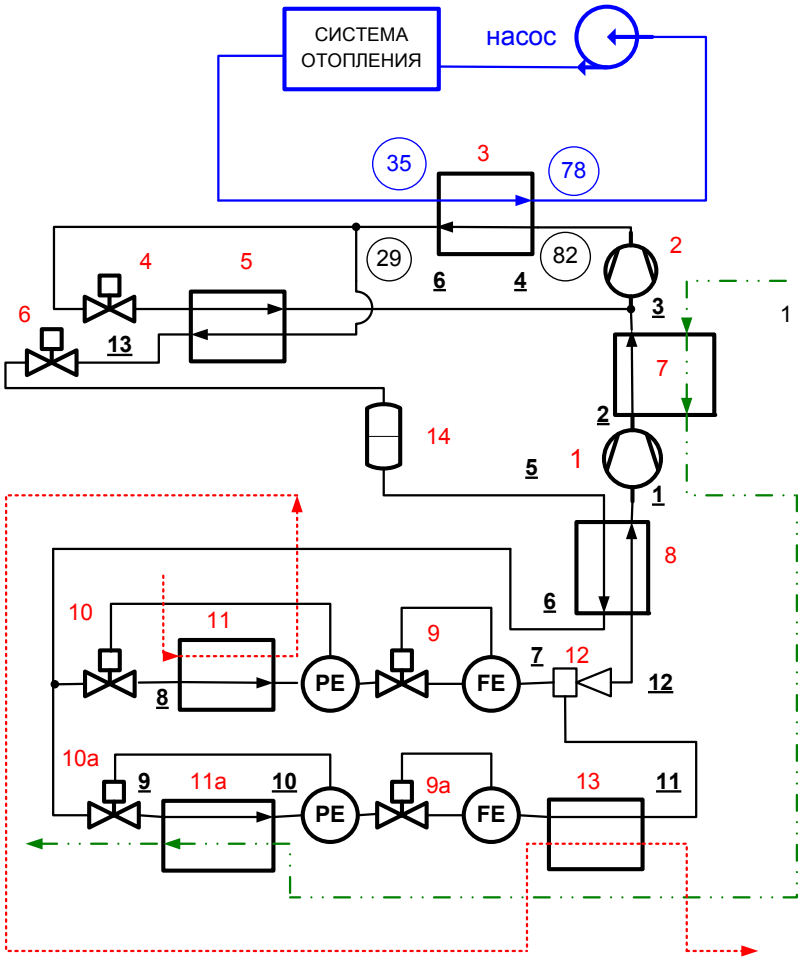


Рис.5. Схема теплового насоса ([1]),
Обозначения на рис. см. ([1])

Схема координированной системы управления гидросистемами имеет вид (рис.6):

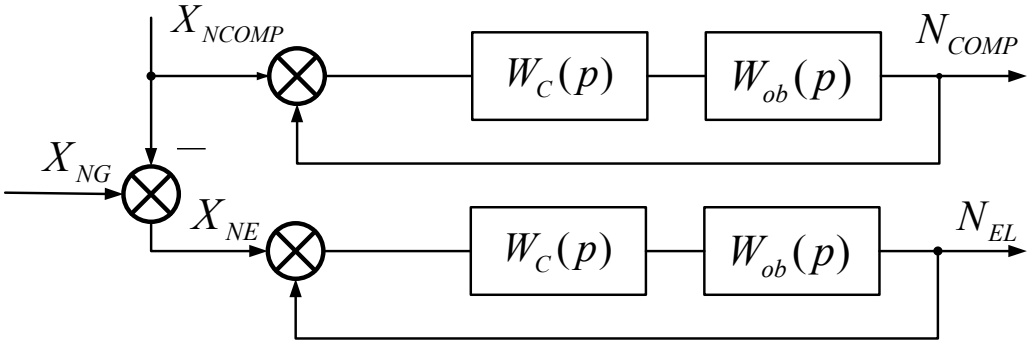


Рис. 6. Структурная схема САУ управления гидросистемами.

На схеме приняты следующие обозначения: X_{NG} – сигнал задания мощности ГПУ, X_{COMP} – сигнал задания мощности компрессора, X_{NE} – сигнал задания мощности генератора, N_{COMP} – мощность компрессора, N_{EL} – мощность генератора.

Сигналы задания в координированной системе связаны зависимостью для любого момента времени:

$$X_{NE}(t) = X_{NG}(t) - X_{COMP}(t). \qquad (9)$$

Нами были исследованы переходные процессы в системе, приведенной на рис.6, а также в классической системе "ведущий – ведомый", где заданием сигнала мощности генератора является разность сигналов между выходом контура регулирования мощности компрессора и сигналом задания мощности ГПУ. Как показали результаты моделирования, качество процессов в системе рис.6, оказалось выше, благодаря отсутствию запаздывания в контуре управления мощностью компрессора.

Выводы

1. В предложенной схеме утилизации теплоты с помощью пластинчатого теплообменника обеспечивается минимум мощности вентилятора для подачи воздуха на испаритель теплового насоса и компенсация пульсаций температуры дымовых газов и напора вентилятора. Показано, как оптимизировать параметры теплообменника из условия минимума диссипации энергии с использованием величины, называемой "энтрансия".
2. Предложена схема координированной системы управления гидравлическими трансмиссиями, передающими мощность на компрессор теплового насоса и электрогенератор, обладающей повышенным качеством управления по сравнению с координированной системой управления типа "ведущий-ведомый".

Литература

[1] Шит М.Л., Иойшер А.М., Шит Б.М., Дорошенко А.В., Чебан Д.Н. энергоснабжение промышленной теплицы С использованием теплового насоса с газовым приводом, часть I. Problemele energeticii regionale, 2(22) 2013, p. 64-78.
[2] Ying-Lin Li, Xiao-Song Zhang, Liang Cai A novel parallel-type hybrid-power gas-driven engine heat pump system. International Journal of Refrigeration 30(2007) 1134-1142.
[3] Калимуллин Р.Ф., Горбачев С.В., Филиппов А.А. Тепловой расчет автомобильных газовых двигателей: методические указания к курсовому проектированию. Оренбург, ГОУ ОГУ, 2007. - 40с.
[4] http://www.promavtsystem.ru/p_gpes.html
[5] http://www.owen.ru/text/84931504
[6] http://www.owen.ru/uploads/aip_40_24-25.pdf
[7] http://www.powercity.ru/site/ru/catalog/291.html
[8] http://www.combienergy.ru/stat967.html
[9] http://www.dieselduck.net/machine/05%20steam/2002%20FWG%20and%20Heat%20Recovery%20System.pdf
[10] Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов. Под ред. Е.Г. Дудникова. – М.; Химия. 1987. 368с.
[11] http://www.duskyrobin.com/tpu/2005-07-00049.pdf

[12] Jiangfeng Guo, Xiulan Huai*, Xunfeng Li, Jun Cai, Yongwei Wang Multi-objective optimization of heat exchanger based on entransy dissipation theory in an irreversible Brayton cycle system. Energy, 2013, 63: 95-102.
[13] Bejan A. Entropy generation through heat and fluid flow. New York: Wiley; 1982.
[14] Bejan A. Second law analysis in heat transfer. Energy 1980;5(8-9):720-32.
[15] Guo ZY, Zhu HY, Liang XG. Entransy e a physical quantity describing heat transfer ability. Int. J Heat Mass Transfer 2007;50(13-14):2545-56.
[16] Shah R. K, Sekuliĉ D. P. Fundamentals of heat exchanger design. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.; 2003.
[17] Giam T.S., Tan K.K., Huang S. Precision coordinated control of multi-axis gantry stages. ISA Transactions 46 (2007) 399–409.

Сведения об авторах

Шит Михаил Львович – к.т.н., в.н.с., лаборатории, «Энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве.
E-mail: mihail_sheet@yahoo.com

Иойшер Анатолий Матусович – к.ф-м.н., зав. лабораторией Микропроводов и нитевидных наноструктур Института "ELIRI" (Кишинев). Область научных интересов: нанотехнология, сенсоры, производство тепла и холода с помощью вихревых труб и термоэлектрических тепловых насосов.
E-mail: amyosher@gmail.com.

Бурчу Виталий, д.т.н., Академик РАЕН. Родился 20.09.1949. В 1976 г. окончил Технический Университет Молдовы. В 1985 защитил кандидатскую диссертацию, а в 2000 г. – докторскую диссертацию. В настоящее время является заведующим лабораторией «Энергетическая эффективность и Возобновляемые Источники Энергии», Институт Энергетики Академии Наук Молдовы

Шит Борис Михайлович – инженер-программист Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве.
E-mail:boris@fld.rambler.ru.

РАСЧЁТ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ТЕЛ АККУМУЛЯТОРОВ ЯВНОГО И СКРЫТОГО ТЕПЛА

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

Аннотация. Рассмотрена задача вычисления значений внутреннего теплового сопротивления рабочих тел, применяемых в аккумуляторах явного и скрытого тепла. Предложена методика расчёта этого сопротивления для тел с твёрдым, жидким материалом и веществом с фазовым превращением. Базируясь на теории регулярного теплового режима, получены формулы для расчёта внутреннего теплового сопротивления твёрдых тел, имеющих форму шара, цилиндра и параллелепипеда. Для тел с жидким веществом это сопротивление находится с учётом стенки сосуда и сопротивления пограничного слоя при естественной конвекции жидкости. В случае веществ с фазовым переходом тепловые сопротивления зон с разным агрегатным состоянием определяются раздельно. Электротепловая модель содержит четыре тепловых сопротивления, две теплоёмкости и один источник напряжения. К внутренним тепловым сопротивлениям тел отнесено сопротивление стенки сосуда и сопротивлений зон, в которых произошло, происходит и будет происходить фазовое превращение. Внутреннее тепловое сопротивление твёрдых тел может считаться постоянным параметром. У тел с жидкостью и фазовым переходом вещества внутренние тепловые сопротивления зависят от теплового состояния тел. Поэтому значения этих величин должны определяться при расчете процессов нагрева или охлаждения тел.
Ключевые слова: Электротепловая модель, внутреннее тепловое сопротивление, аккумуляторы явного и скрытого тепла, вещества с фазовым переходом.

CALCULUL REZISTENȚEI TERMICE INTERNE A CORPULUI DE LUCRU AL ACUMULATOARELOR DE CĂLDURĂ SENSIBILĂ ŞI LATENTĂ

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

Rezumat. În lucrare se examenează problema determinării valorilor rezistenței interne termice a corpurilor de lucru ale acumulatoarelor de căldură sensibilă și latentă. Este propusă metodica de calcul al acestei rezistențe pentru corpurile din material solid, lichid, şi substanțe cu tranziție de fază. Pe baza teoriei regimului termic regulat, s-au obținut formule de calcul al rezistenței termice interne a solidelor în formă de sferă, cilindru şi paralelipiped. Pentru corpurile cu substanță lichidă această rezistență se determină ținând cont de pereții vaselor și rezistența stratului de hotar și convecția naturală a lichidului. În cazul substanțelor cu tranziție de fază se propune determinarea aparte a rezistențelor termice a zonelor cu diferite stări de agregare. Modelul electrotermic conține patru rezistențe de căldură, capacitatea de căldură și o singură sursă de tensiune. La rezistența termică internă a corpurilor se referă rezistența pereților containerului și rezistență de zone în care a fost este, și va fi tranziție de fază. Rezistența termică internă a solidelor poate fi considerată ca un parametru constant. În corpuri cu lichide rezistență termică internă de material depinde de starea lor termică. Prin urmare, aceste valori ar trebui să fie stabilite în procesele de calcul de încălzire sau de răcire.
Cuvinte-cheie: Modelul electrotermic, rezistența termică internă, acumulatoare de căldură sensibilă şi latentă, substanțe cu tranziție de fază.

CALCULATION OF INTERNAL THERMAL RESISTANCE OF WORKING BODIES OF PACKEDBED SENSIBLE AND LATENT HEAT STORAGES

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

Abstract. The paper considers the problem of calculating values of the internal thermal resistance of a packed bed sensible and latent heat storages working bodies. The methodic calculation of this resistance for bodies with solid, liquid substance and phase-change materials is offered. Being based on the theory of a regular thermal

mode, formulas for calculation of internal thermal resistance of the bodies having the form of a sphere, the cylinder and a parallelepiped are obtained. For bodies with liquid substance this resistance is in view of a wall of vessels and resistance of a boundary layer at natural convection of liquids. In the case of substances with a phase transition heat resistance zones with different states of aggregation shall be determined separately. Electro-thermal model contains of the four thermal resistances, two heat capacity and single voltage source. Internal thermal resistance of solids can be considered as a constant parameter. For bodies of liquid and phase change material internal thermal resistance depends on their thermal state. Therefore, these values should be determined in the calculation processes of their heating or cooling.
Key words: Electro-thermal model, sensible and latent heat storages, internal thermal resistance, phase change materials.

1.Введение

Аккумуляторы явного и скрытого тепла широко применяются в различных энергетических устройствах [1,2]. Одним из распространенных видов таких устройств, применяемых, например, в системах солнечного теплоснабжения, является аккумулятор со слоевой насадкой [3]. Накопление тепловой энергии происходит в материале большого количества сравнительно небольших тел, размещённых в теплоизолированном корпусе. В аккумуляторах могут быть использованы тела, с твёрдым или жидким веществом, а также материалы с фазовым переходом. Эти тела образуют проницаемую для теплоносителя пористую среду, имеющую регулярный характер в случае тел правильной формы (шары, цилиндры, параллелепипеды и т.д.). Через эту среду при зарядке аккумулятора прокачивается горячий жидкий или газообразный теплоноситель, который нагревает эти тела, обеспечивая повышение их внутренней энергии. Для разрядки аккумулятора и передачи тепла в нагрузку через насадку прокачивается холодный теплоноситель, который нагревшись, отдаёт затем тепло в нагрузку. Таким образом, аккумулятор является промежуточным звеном между источником тепла и нагрузкой, и служит для преодоления несоответствия во времени и пространстве между процессами генерации и потребления тепла.

При исследованиях и проектировании аккумулятора тепла, например, для устройств солнечной энергетики, основной задачей является расчёт нестационарного теплообмена между теплоносителем и аккумулирующей средой. Решение этой задачи необходимо для оптимизации конструкции аккумулятора тепла и параметров режимов его зарядки и разрядки. Моделирование тепловых процессов в проницаемой пористой среде таких устройств осложнено произвольными и изменяющимися во времени начальными и граничными условиями.

Для решения задачи нестационарного теплообмена тел обычно интегрируются уравнения в частных производных при соответствующих начальных и граничных условиях [4,5]. Для аккумуляторов тепла используются граничные условия третьего рода, когда теплообмен со средой подчиняется закону Ньютона, а теплопроводность тела описывается законом Фурье:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = -\frac{\alpha(T_{П} - T_{TH})}{\lambda}, \qquad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности; $T_{П}$ - температура поверхности тела; T_{TH} - температура теплоносителя; n - внешняя нормаль к поверхности тела. Для тел простой формы решение линейной задачи нестационарного теплообмена при охлаждении изотропного тела обычно представляют в форме бесконечного ряда [4,5,6]:

$$\vartheta = \sum_{0}^{\infty} A_k U_k \exp(-m_k t), \qquad (2)$$

где ϑ - пространственно-временная безразмерная избыточная температура тела; A_k - тепловые амплитуды, зависящие от начального распределения температур в теле; U_k - собственные функции, которые зависят только от координат; m_k - коэффициенты, независящие ни от координат, ни от времени; t - размерное время. Эта модель точно описывает нестационарное температурное поле тела как системы с распределёнными параметрами.

Однако при моделировании длительных тепловых процессов такой подход неудобен из-за значительных затрат времени. Оно также сопряжено с математическими трудностями при определении верхней границы ряда (2) а также корней характеристического уравнения в форме тригонометрических функций или функций Бесселя, зависящих от нескольких параметров. Поэтому, в условиях отсутствия стандартного программного обеспечения и слабой освещенностью данного вопроса в теплотехнической литературе, применение точных решений на практике затруднено. Кроме того, возникает проблема решения задач нестационарного теплообмена тел с жидкой аккумулирующей средой или при использовании веществ с фазовым переходом. Для решения подобных задач более эффективным представляется известный подход, использующий электротепловую схему замещения объекта для анализа тепловых процессов (в солнечных коллекторах, зданиях, электронных устройствах и т.д.) [3,7,12,13]. В работе [8] предложен новый, более простой и достаточно эффективный метод расчета нестационарных температурных полей в неоднородных средах с использованием цепочечной электротепловой схемы. Расчёт нестационарного температурного поля осуществляется численно с использованием метода узловых потенциалов, применяемого в электротехнике [9].

Таким образом, рабочее тело аккумуляторов тепла, являющееся в тепловом отношении системой с распределёнными параметрами, предлагается представлять простейшей моделью с сосредоточенными параметрами. Такой подход был применён ранее для более сложных анизотропных тел с внутренними источниками тепла – электрических конденсаторов [10]. Основная проблема, которая возникает при этом – это определение параметров электротепловой схемы замещения тел, при которых обеспечивается адекватное моделирование переходных тепловых процессов в телах. Поскольку рабочие тела являются интегрирующими элементами, нас не интересует точное пространственное распределение мгновенных значений температур в телах и теплоносителе, и расчёт осуществляется для средних по поверхности и объёму температур и на интервалах временной дискретизации [4,16].

2.Расчёт параметров электротепловой схемы замещения тел, аккумулирующих явное тепло

Для моделирования динамики средних температур рабочих тел, аккумулирующих явное тепло, достаточно использовать простейшую трехэлементную схему, состоящую из двух последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 и одной ёмкости C (рис.1). Параметрами электротепловой схемы замещения тела являются значения наружного тепловое сопротивления R_1 (^{o}C/Вт);– внутреннего теплового сопротивления R_2 (^{o}C/Вт) и C – тепловой ёмкости (Дж/^{o}C).

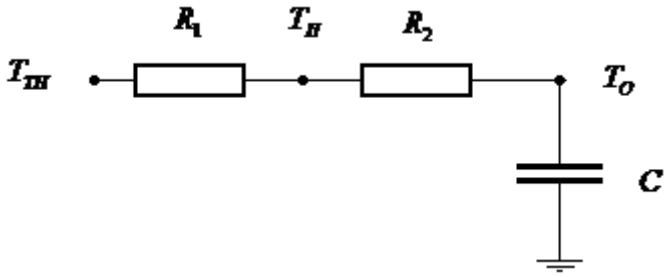


Рис.1. Простейшая электротепловая схема замещения рабочего тела.
T_{TH} - температура теплоносителя; $T_{П}$ - средняя температура поверхности тела;
T_O - среднеобъёмная температура тела

Параметры эквивалентной электротепловой схемы замещения рабочего тела определяются следующим образом. Наружное тепловое сопротивление R_1 рассчитывается по известной формуле [6]:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha F}, \tag{3}$$

где α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности единичного тела.

Теплоёмкость единичного тела определяется по формуле:

$$C = m_1 c_y, \tag{4}$$

где m_1 – масса тела; c_y – удельная теплоемкость материала тела.

Основную трудность представляет определение внутреннего теплового сопротивления тела R_2. Предлагаемая нами методика его определения основана на использовании теории регулярного теплового режима [4,5]. Согласно этой теории при ступенчатом скачке температуры окружающей среды изменение во времени температуры в любой точке тела, спустя некоторый иррегулярный интервал, происходит по экспоненциальному закону с одним постоянным темпом. Значение этого темпа определяется по формуле:

$$m = \frac{\alpha F}{C}\Psi, \tag{5}$$

где Ψ – коэффициент неравномерности температурного поля в теле. В регулярном тепловом режиме этот коэффициент постоянен и равен отношению разностей между средними температурами по поверхности ($T_{П}$) и по объёму (T_O) и теплоносителя:

$$\Psi = \frac{T_{П} - T_{TH}}{T_O - T_{TH}}, \tag{6}$$

где T_{TH} - температура теплоносителя.

Предельные значения коэффициента Ψ, согласно работе [5], лежат в диапазоне 0 (при $\alpha \to \infty$) и 1 (при $\alpha \to 0$).

Предельное значение темпа охлаждения или нагрева имеет место при $\alpha \to \infty$. Этот случай в соответствии с формулой (3) соответствует нулевому значению наружного теплового сопротивления в электротепловой схеме замещения рабочего тела (рис.1). Значение m_∞ определяется по формуле, следующей из третьей теоремы Кондратьева, согласно которой предельное значение темпа охлаждения тела и температуропроводность материала пропорциональны [5]:

$$m_\infty = \frac{a}{K_f}, \tag{7}$$

где K_f – коэффициент формы единичного тела, a – коэффициент температуропроводности или тепловой диффузии вещества тела и определяется по известной формуле [4,6]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_y}, \tag{8}$$

где λ, ρ -соответственно удельная теплопроводность и плотность вещества тела.

Электротепловым аналогом для постоянной времени цепи, показанной на рис.1, является тепловая постоянная времени тела, которая рассчитывается по формуле:

$$\tau_T = C\left(R_1 + R_2\right) \tag{9}$$

С такой постоянной по экспоненциальному закону изменяется во времени температурное поле тела в регулярном тепловом режиме. Исходя из формулы (9) можно выделить две составляющие тепловой постоянной времени тела, обусловленные его наружным и внутренним тепловыми сопротивлениями. «Внутренняя» составляющая является величиной, обратной предельному темпу охлаждения или нагрева m_∞ тела в регулярном тепловом режиме, т.е.:

$$\tau_{T2} = CR_2 = \frac{1}{m_\infty} \tag{10}$$

Из (7), (8) и (10) следует, что внутреннее тепловое сопротивление тел можно рассчитывать по формуле:

$$R_2 = \frac{K_f}{Va\rho c_y} \tag{11}$$

где V – объем тела. В табл.1 приведены формулы расчёта коэффициента формы K_f.

Таблица 1

Формулы для расчёта коэффициента формы тел правильной формы

Форма тела	Шар	Цилиндр	Параллелепипед
Коэффициент K_f	$\left(\frac{R}{\pi}\right)^2$	$\left[\left(\frac{2,4}{R}\right)^2+\left(\frac{\pi}{h}\right)^2\right]^{-1}$	$\left[\left(\frac{\pi}{L_1}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L_2}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L_3}\right)^2\right]^{-1}$

Для тел с жидким аккумулирующим тепло материалом внутреннее тепловое сопротивление состоит из сопротивления стенок сосуда и сопротивления теплопередачи от его внутренней стенки к жидкости. Первая компонента, пренебрегая кривизной стенок, определяется по известной формуле [6]:

$$R_{CT}=\frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}F_{CT}}, \tag{12}$$

где δ_{CT}, λ_{CT}, F_{CT} - соответственно толщина, удельный коэффициент теплопроводности материала, площадь стенки сосуда.

Сопротивление теплоотдачи от стенки сосуда к жидкости определяется в режиме свободной конвекции в сосуде [6,7,13]. При этом, учитывая, что толщина пограничного слоя существенно меньше размеров сосуда, нами предлагается использовать формулы для расчёта коэффициента теплоотдачи как для случая неограниченного пространства [6,7,12,13]. В качестве температурного напора, по которому определяется закон внутреннего теплообмена, принята разность температур между стенкой сосуда и среднеобъёмной температурой жидкости. Если абсолютное значение этой разности удовлетворяет условию (13), то теплообмен подчиняется зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора в степени 1/4:

$$\left|\left(T_{CT}-T_{Ж}\right)\right|\le\left(\frac{840}{L_{ОП}}\right)^3, \tag{13}$$

где T_{CT} – температура стенки; $T_{Ж}$ – среднеобъёмная температура жидкости; $L_{ОП}$ – определяющий размер сосуда. В противном случае имеет место теплообмен по зависимости степени 1/3 температурного напора. Так, в случае степенной зависимости в 1/4 для вертикально ориентированной поверхности или цилиндра высотой $L_{ОП}$ конвективный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [12]:

$$\alpha_K=0,25A\frac{\left(T_{CT}-T_{Ж}\right)^{0,25}}{L_{ОП}}, \tag{14}$$

где A – коэффициент, учитывающий все теплофизические параметры жидкости. Значение коэффициента A для воды, которая наиболее приемлема в качестве аккумулирующего вещества, в первом приближении вычисляется по формуле [12]:

$$A=80+1,63T_{Ж}, \tag{15}$$

где $T_Ж$ - температура воды.

Тогда внутреннее тепловое сопротивление сосудов с водой можно рассчитывать по формуле:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_K F} + R_{CT}, \qquad (16)$$

где F – площадь поверхности стенки сосуда; R_{CT} - тепловое сопротивление стенки сосуда, которое рассчитывается по формуле (10). При малой разности температур $(T_{CT} - T_Ж)$ теплопередача происходит, в основном, путём чистой теплопроводности и внутреннее сопротивление тела определяется так же, как для твёрдых тел. Границы между этими случаями определяются по значению числа Рэлея [13].

Таким образом, при жидком аккумулирующем веществе внутреннее тепловое сопротивление рабочего тела зависит от температурного напора и средней температуры жидкости, т.е. является переменным параметром, зависящим от теплового состояния тела. Это учитывается при моделировании температурного поля аккумуляторов тепла[14].

3. Методика расчёта параметров электротепловой схемы замещения тел, аккумулирующих неявное тепло

В случае тел, содержащих вещество с фазовым переходом, обычно рассматривается двухслойная система с подвижной границей раздела фаз с разным агрегатным состоянием вещества и отсутствием гистерезиса в точке фазового перехода [15]. Граница между зонами перемещается во времени и пространстве. Расположение и форма этих зон зависит от режима работы и формы сосуда. Так, при нагреве тела зона жидкого вещества располагается у поверхности сосуда, а при охлаждении – наоборот. Когда всё вещество тела находится в одном агрегатном состоянии (жидком или твёрдом), к ним применима электротепловая схема замещения, приведенная на Рис.1. Для расчёта внутреннего теплового сопротивления тел используются формулы (11) и (16), в которых учитывается сопротивление стенки сосуда. В промежуточных состояниях вещества тела электротепловая схема замещения рабочего тела становится более сложной (Рис.2).

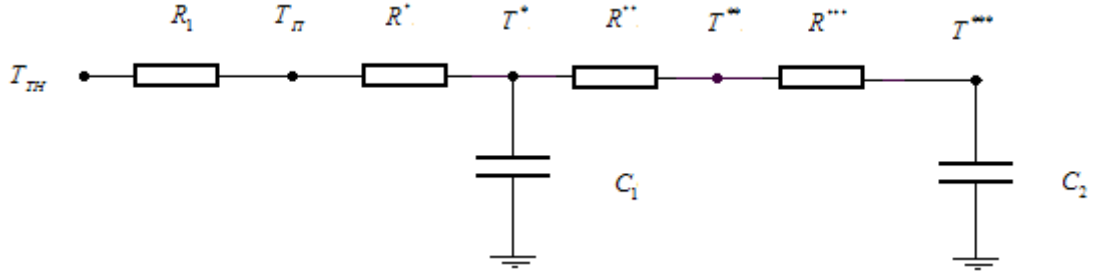


Рис.2. Электротепловая схема замещения рабочего тела с фазовым переходом вещества

На рис.2 показаны следующие величины: $T_{ТН}$ – температура теплоносителя; $T_П$ – температура поверхности рабочего тела; T^* – среднеобъёмная температура зоны, в которой произошло фазовое превращение; T^{**} – температура фазового перехода вещества рабочего тела; $T^{***}\Delta\tau$ – среднеобъёмная температура зоны тела, в которой будет проис-

ходить фазовое превращение; R_1 – наружное тепловое сопротивление тела; R^* – тепловое сопротивление контейнера и зоны тела, в которой произошло фазовое превращение; R^{**} – тепловое сопротивление зоны тела, в которой происходит фазовое превращение; R^{***} – тепловое сопротивление зоны тела, в которой будет происходить фазовое превращение; C_1 – тепловая ёмкость вещества, завершившего фазовый переход; C_2 – тепловая ёмкость вещества зоны, в которой будет происходить фазовый переход.

Наружное тепловое сопротивление и теплоёмкости C_1 и C_2 таких тел рассчитывается таким же образом как в случае тел, аккумулирующих явное тепло, учитывая при этом зависимость теплофизических параметров материала от температуры.

Тепловое сопротивление зон с разным агрегатным состоянием определяется по формуле для теплопередачи через слои вещества[15]:

$$R_2 = \frac{\delta_C}{\lambda_C F_C}, \tag{17}$$

где δ_C; F_C ; λ_C - соответственно толщина, площадь и удельная теплопроводность вещества зоны. Поскольку при нагреве или охлаждении рабочих тел изменяются значения δ_C и F_C, внутренние тепловые сопротивления зон не являются константами и определяются по формуле (17) в процессе расчета температурного поля в аккумуляторе тепла.

Для расчёта сопротивления зоны материала, находящегося в стадии фазового перехода предварительно определяется энергия теплообмена:

$$E_{TO} = Q_1 \Delta\tau, \tag{18}$$

где Q_1 - мощность теплообмена тела с теплоносителем; $\Delta\tau$ -интервал времени нагрева.

По этой энергии и удельной энергии фазового перехода находится объём вещества, претерпевающего фазовый переход, а по нему геометрический размер зоны этого вещества. Зная размеры этих зон можно рассчитать их тепловые сопротивления. Так, например, для тела цилиндрической формы с диаметром d и длиной h и тела шарообразной формы для теплового сопротивления этих зон, применяем формулы, приведенные в работе [13] для стенок цилиндрической и шарообразной формы:

$$R_{ц} = \frac{\ln(\frac{d_1}{d_2})}{2\pi h\lambda} \tag{19}$$

$$R_{ш} = \frac{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}}{2\pi\lambda}, \tag{20}$$

где d_1 и d_2 – соответственно наружный и внутренний радиус зоны; λ – удельная теплопроводность материала данной зоны. При этом предполагается, что соблюдается симметрия зон с разным агрегатным состоянием, а теплообменом по торцам цилиндра пренебрегаем. Для учёта влияния конвекции в зоне с жидким состоянием вещества

можно применить такой же подход, как в случае воды с соответствующей коррекцией теплофизических параметров. Формулы (19) и (20) следует рассматривать как первое приближение, поскольку в реальных условиях границы зон с разным агрегатным состоянием имеют более сложную форму из-за их асимметричности.

Сравнение результатов расчета по трехэлементной электротепловой схеме (Рис.1) и точного метода [4] для тела шарообразной формы с твёрдым веществом показало удовлетворительную для инженерных расчётов точность: погрешность по данной методике не превышает 10% . Это видно на примере данных для тела сферической формы (Табл.2). При этом наибольшая погрешность наблюдается для температуры поверхности тел при временах, меньших продолжительности иррегулярного теплового режима.

Таблица 2

Относительная ошибка упрощённого расчёта среднеобъёмной температуры

	Число Фурье $Fo = \frac{4at}{D^2}$				
Критерий $Bi = \frac{\alpha D}{2\lambda}$	0,01	0,1	1	10	10 0
0,1	0,008	0,0048	0,0019	0	0
1	0,022	0,0062	0,0083	0	0
10	0,058	0,018	0,0097	0	0
100	0,083	0,018	0,011	0	0

Выводы.

Предложен простой метод расчёта внутреннего теплового сопротивления тел правильной формы основанный на использовании теории регулярного теплового режима.

Твёрдые тела, аккумулирующие явное тепло, имеют внутреннее тепловое сопротивление, являющееся постоянным параметром, зависящим от его формы, размеров и вида материала.

У тел с жидким аккумулирующим веществом внутреннее тепловое сопротивление зависит от температурного напора между стенкой и основной массой жидкости.

Для тел с фазовой трансформацией вещества тепловые сопротивления разных зон также зависят от их теплового состояния и геометрии зон. По этой причине значения внутренних тепловых сопротивлений тел с жидкостью или фазовым переходом необходимо вычислять в процессе расчета всего интервала их нагрева или охлаждения.

Литература

[1] Бекман Г. и Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. Перевод с английского под ред. Д.т.н. проф.Бродянского В.М. М. Мир. 1987.- 271с.

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

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

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

[5] Конратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат. 1954.361 с.

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

[7] Thermal Modeling Handbook. K&K Associates. USA. 2003. 29p.

[8] Ермуратский В., Грицай М., Шаповалов В. Метод расчёта нестационарных температурных полей в неоднородных средах. Математическое моделиро-

вание в образовании, науке и производстве. Материалы IV Международной научно-практической конференции 5-9 июня 2005г. Тирасполь, 2005.
[9] Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и Страхов С.В.Основы теории цепей. М-Л. Энергия. 1965. 444 с.
[10] Справочник по электрическим конденсаторам. Общие сведения, выбор и применение. Под общ. Ред. К.т.н. Ермуратского В.В. Кишинёв. Штиинца. 1982. 310 с.
[11] Кришер О. Научные основы техники сушки. Изд-во иностр. Лит, 1961.246 с.
[12] Дульнев Г.Н. и Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. Энергия. 1968.-359 с.
[13] Leca A., Mladin E-C., Stan M. Transfer de căldură şi masă – o abordare inginerească. Ed. Tehnică. Bucureşti. 1998. 783p.
[14] Ермуратский В.В. и Грицай М.А. Методика расчёта нестационарного температурного поля в накопителях тепловой энергии со слоевой насадкой. Проблемы региональной энергетики. 2013 №3.
[15] Dutil Y., Rousse D., Salah N., Lassue S., Zalewski L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 112–130.
[16] Whitaker S. The method of volume averaging. 1998. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 219 p.

Сведения об авторах

Ермуратский Владимир Васильевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, энергетическая эффективность, теплоэнергетика, 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**