

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 59 (1032) 2013

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2013

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 59 (1032). – 197с.

Державне видання

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

У квітні 2013 р. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;
В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.;
В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
В. І. НІКОЛАСНКО, канд. іст. наук, проф.; П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.;
В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І. О. Костюков, асистент.

Члени редколегії: С. Ф. Артюх, д-р техн. наук, проф.; В. Є. Бондаренко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Безпрозваних, д-р техн. наук, проф.; Ю. М. Вепрік, д-р техн. наук, проф.; О. Г. Гриб, д-р техн. наук, проф.; Г. А. Сендерович, д-р техн. наук, проф.; О. П. Лазуренко, канд. техн. наук, проф.; К. В. Махотіло, канд. техн. наук, доц.; С. Ю. Шевченко, канд. техн. наук, доц.

З номеру 42'2012 Вісник НТУ «ХПІ» має власну подвійну нумерацію: № 42 (948).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № від квітня 2013 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2013

С. Ф. АРТЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Н. А. ЛЮБИМОВА, канд. техн. наук., доц. ХНАУ им. В. В.
Докучаева, Харьков

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ВОЗДУХООЧИСТКИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье предлагается схема контроля и управления системой воздухоочистки предприятий энергетической промышленности от композиции фенола, метанола и формальдегида с помощью 2-ступенчатой биотехнологии.

Ключевые слова: контроль, управление, воздухоочистка, фенол, формальдегид, метанол, биотехнология

Вступление. Энергетическое производство выдает товарный продукт в виде электрической и тепловой энергии, трансформированной из потенциальной энергии топлива. При этом материальные ресурсы целиком превращаются в отходы, поступают в виде газообразных и жидких продуктов сгорания в окружающую среду. Вместе с продуктами сгорания поступают все примеси исходного топлива – часть золы, многие элементы таблицы Менделеева, окись углерода, частицы недогоревшего твердого топлива, продукты неполного сгорания жидких топлив, окислы серы и азота, многие металлы.

Анализ последних исследований. Эксплуатация тепловых электрических станций сопряжена с появлением ряда жидких отходов – сточных вод. К ним относятся воды после охлаждения различных аппаратов – конденсаторов турбин, масло – и воздухоохладителей, движущихся механизмов и др.; сбросные воды из систем гидрозолоудаления (ГЗУ), отработавшие растворы после химических очисток теплосилового оборудования или его консервации, регенерационные и шламовые воды от водоочистительных установок, нефтезагрязненные стоки; растворы, возникающие при обмывках наружных поверхностей нагрева главным образом воздухоподогревателей и водяных экономайзеров котлоагрегатов, работающих на сернистом мазуте. Составы всех этих стоков весьма различны. Они определяются типом ТЭС и установленного на ней оборудования, ее мощностью, видом используемого топлива, составом исходной воды, принятым способом водоподготовки в основном

© С. Ф. Артюх, Н. А. Любимова, 2013

производстве и другими менее существенными обстоятельствами.

Цель исследования Создание ТЭС, не загрязняющие природные водоемы, возможно двумя путями – глубокой очисткой всех стоков до предельно допустимых концентраций (ПДК) или организацией систем повторного использования стоков. Первый путь неперспективен, так как органы охраны водоемов непрерывно повышают требования к степени очистки сточных вод. Применение в технологии водообработки новых материалов и реагентов потребует и для них новые ПДК. Повышение же глубины очистки стоков потребует значительного увеличения затрат как на сооружение соответствующих установок, так и на их эксплуатацию. Все это делает первый путь мало перспективным. Второй путь более реален. Это создание оборотных систем с многократным использованием воды. При этом достаточно довести качество очистки до уровня, приемлемого для осуществления соответствующих технологических процессов. Такой путь существенно сокращает водопотребление, резко сокращается число вопросов, подлежащих согласованию с контролирующими стоки органами. Именно этот путь бессточных ТЭС наиболее приемлем.

Количество вод, образующихся после охлаждения аппаратуры, определяется в основном количеством отработавшего пара, поступающего в конденсаторы турбин. Следовательно, больше всего этих вод на конденсационных ТЭС и АЭС, где часовое количество воды охлаждающей конденсаторы турбин, Q , т/час, может быть найдено по формуле $Q=KW$, где W – мощность станции в Мвт, а K – коэффициент, значение которого для ТЭС в интервале 100-150, а для АЭС – 150 – 200.

В некоторых случаях охлаждающие воды несут посторонние вещества, когда в систему охлаждения включены также маслоохладители, нарушение плотности которых может приводить к проникновению нефтепродуктов в охлаждающую воду. Наиболее надежным направлением решения этой задачи является выделение охлаждения таких аппаратов, как маслоохладители и им подобные, в особую автономную систему, отдельную от «чистых» аппаратов.

На ТЭС, использующих твердое топливо, удаление значительных количеств золы и шлака выполняется обычно гидравлическим способом, что требует большого количества воды. Основным направлением эвакуации золы и шлака со станции при этом является создание оборотной системы ГЗУ, когда освободившаяся от частичек золы и шлака осветленная вода вновь направляется по обратному трубопроводу на ТЭС для выполнения той же функции. Часть воды при этом обороте выходит из системы, так как задерживается в порах осевшей золы, вступает в химические соединения с компонентами этой

зола, а также испаряется и просачивается в грунт. Поэтому важнейшим вопросом при создании оборотных систем ГЗУ является обеспечение баланса между поступлением и расходом воды, что необходимо учитывать в различных технологических процессах, в том числе в золоулавливании.

Необходимость создания оборотных систем ГЗУ обусловлена также тем, что такие воды содержат в ряде случаев повышенную концентрацию фторидов, мышьяка, ванадия, реже ртути и германия (днецкие угли). Воды ГЗУ также часто содержат канцерогенные органические соединения, фенолы и другие...

Материалы исследований Стоки после химической промывки или консервации теплосилового оборудования весьма разнообразны по своему составу вследствие разнообразных рецептов промывочных растворов. Кроме минеральных кислот - соляной, серной, плавиковой, сульфаминовой, применяется много органических кислот (лимонная, ортофталевая, адипиновая, щавелевая, муравьиная, уксусная и т.д.). Наряду с ними используются трилон и различные смеси кислот, являющиеся отходами производства, а в качестве ингибиторов коррозии вводятся каптакс, поверхностно - активные вещества, сульфированные нафтеновые кислоты и т.д. Для связывания в комплекс меди в промывочные смеси вводится тиомочевина. Консервационные растворы содержат гидразин, нитриты и аммиак.

Большинство органических соединений, применяемых в промывочных растворах, поддается биологической переработке и, следовательно, может быть направлено вместе с хозяйственно - бытовыми сточными водами на соответствующие установки. Перед этим необходимо удалить из отработавших промывочных и консервационных растворов токсичные вещества, пагубно действующие на активную микрофлору. К таким веществам относятся ионы металлов - меди, цинка, никеля, железа, а также гидразин и каптакс. Трилон относится к биологически «жестким» соединениям, к тому же он подавляет активность биологических факторов. Все эти условия диктуют определенную технологию очистки стоков от химической очистки оборудования. Они должны быть собраны в отдельные емкости. При этом должен быть осуществлен технический контроль их количества.

Воды от обмывки наружных поверхностей нагрева образуются только на ТЭС, использующих в качестве основного топлива сернистые мазуты. Зольные элементы, образующиеся при сгорании мазута, обладают большой липучестью и оседают преимущественно на поверхности элементов воздухоподогревателей, которые вследствие этого приходится регулярно очищать. Периодическая очистка

осуществляется путем обмывок. Обмывочная жидкость содержит свободную серную кислоту и сульфаты железа, ванадия, никеля, меди и натрия. Обезвреживание этих обмывочных растворов сопровождается получением шламов, содержащих ценные вещества.

При эксплуатации водоочисток на электростанциях возникают стоки от промывок механических фильтров, от удаления шламовых вод осветлителей и в результате регенерации катионитных и анионитных материалов.

Регенерационные стоки содержат в растворе значительное количество солей кальция, магния и натрия. Во многих случаях сброс такого количества солей (300-400 кг/час, 2-2,5 т/час в зависимости от вида водоочистки) в естественные водоемы запрещен. Привлекательной представляется следующая схема переработки стоков: после смешивания кислых (от Н - катионита) и щелочных (от анионита) стоков проводится обработка их известью и содой для осаждения ионов кальция и магния. Раствор после отделения от образовавшихся осадков содержит только соли натрия, хлориды и сульфаты. Этот раствор подвергают гидролизу, получая при этом кислые и щелочные растворы. Они направляются взамен привозных кислот и щелочи на регенерацию соответствующих фильтров. Расчеты показывают, что таким образом количество избыточных солей может быть уменьшено в несколько раз.

Качественный и количественный контроль фенольных сточных вод энергетических предприятий имеет народнохозяйственное значение и нуждается в специальной организации.

Методы дефеноляции сточных вод разделяются на две большие группы [1]. Первая охватывает так называемые регенеративные методы, в которых преследуется цель наряду с очисткой сточных вод извлечь и выделить фенолы в виде товарного продукта. Последний чаще всего служит исходным сырьем в производстве пластмасс (фенолпластиков). Ко второй группе относятся методы, в которых фенолы, содержащиеся в сточных водах, подвергаются уничтожению тем или иным способом (так называемые деструктивные методы).

Целесообразность применения метода первой или второй группы в каждом конкретном случае определяется с практической и технико-экономической точек зрения. Для небольших предприятий, на которых выход сточных вод не превышает нескольких куб. метров в сутки, извлечение фенолов неэкономично и нецелесообразно, поскольку необходимые для этого установки требуют больших капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Уничтожение же фенольных вод, в данном случае, может осуществляться другими более простыми, экономичными и эффективными методами. Крупным предприятиям

при условии достаточной концентрации фенолов в сточных водах следует рекомендовать регенеративный метод дефеноляции, хотя бы уже потому, что утилизация фенола позволит покрыть существенную часть расходов, связанных с очисткой сточных вод [1].

Результаты исследований На практике аспирационный воздух промышленных предприятий может содержать несколько нежелательных токсических веществ в их композиции. Одновременное содержание в воздухе различных токсических веществ может многократно усиливать негативный эффект антропогенной загрузки. Разработанная модель относится к способам очистки воздуха (например, литейного производства – сопутствующего энергетическому предприятию) от органических газообразных выбросов, в частности, фенола, формальдегида и метанола.

Задачей данного решения является создание способа удаления из аспирационного воздуха загрязнений – фенола, формальдегида и метанола путем использования физико – химических и биологических методов, в результате чего достигается необходимая степень очистки воздуха и уменьшение энергозатрат процесса. При этом для выполнения требований рационального и технологичного процесса необходимо организовать соответствующие контроль и управление. В способе удаления из аспирационного воздуха метилового спирта, формальдегида и метанола, в соответствии с предлагаемой моделью, выполняют орошение воздуха водой с последующим биоокислением сорбированных водой вышеуказанных соединений и рециркулируют очищенную воду на повторное орошение аспирационного воздуха. При этом биоокисление сорбированных водой загрязнителей выполняют в две ступени различными бактериями. При определенных неблагоприятных условиях, например, при повышенных концентрациях фенола в циркуляционной воде, биоокисление формальдегида и метанола ингибируется, а степень их биоокисления снижается. Поэтому биоокисление загрязнений в циркуляционной воде выполняется в две ступени [1]. Способ выполняется следующим образом: аспирационный воздух, который содержит в себе фенол, формальдегид и метанол орошают циркуляционной водой в массообменном аппарате (скруббер, абсорбер, колонна), очищенный воздух выбрасывается в атмосферу, а циркуляционная вода с сорбированными в ней фенолом, формальдегидом и метанолом поступает на биоочистку в двухступенчатый биотенк до конечных значений концентрации загрязнений на уровне 0,1 - 0,5 мг/л. После очистки циркуляционная вода возвращается в цикл орошения аспирационного воздуха. Биохимическая регенерация циркуляционной воды выполнялась с помощью бактерий на первом и втором уровне.

После очистки циркуляционная вода возвращается в рециркуляционный бак (РБ) для выполнения следующего цикла орошения аспирационного воздуха и других технологических целей.

Важной стадией является определение влияния на степень биоокисления соотношения концентраций формальдегида и метанола в циркуляционной воде, которая поступает на вторую ступень очистки биотенка.

Таблица – Соотношения концентраций загрязнителей в циркуляционной воде на степень их биоокисления на 2-ой ступени биотенка

Соединение-загрязнитель	Степень биоокисления, % при соотношениях концентраций, СН ₂ О, СН ₃ ОН							
	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	6/1	7/1	8/1
формальдегид, СН ₂ О	99	99	99	99	99	98	96	95
метанол СН ₃ ОН	96	98	99	99	99	99	98	97

Анализ данных табл. 1 свидетельствует о том, что оптимальными соотношениями концентраций формальдегида и метанола в циркуляционной воде, которая поступает на 2-ю ступень биотенка есть соотношение (2 - 6):1.

Способ выполнялся в лабораторных и промышленных условиях (см. рис.1). Объектом исследования были:

- в лабораторных условиях – аспирационный воздух, полученный в процессе полимеризации фенол – формальдегидной композиции;
- в опытно-промышленных условиях – аспирационный воздух литейных цехов на участке изготовления литейных форм.

С целью расширения диапазона концентраций фенола, формальдегида и метанола в аспирационном воздухе в фенол-формальдегидные смеси добавляли в определенных дозах каждый из указанных ингредиентов. За счет этого состав аспирационного воздуха при выполнении опыта изменялся в следующих границах:

- содержание фенола – (5 - 30 мг/м³);
- содержание формальдегида – (4 – 20 мг/м³);
- содержание метанола – (3 – 5 мг/м³).

Вода после контакта с загрязненным воздухом поступала в двухступенчатый биотенк, в котором выполнялась ее биорегенерация. Далее циркуляционная вода подавалась в отстойник для разделения ее с активным илом после чего она возвращалась в абсорбер, предварительно накапливаясь в рециркуляционном баке. Степень очистки см. в табл. 2.

В процессе дефеноляции сточных вод выполнялся необходимый функциональный контроль концентрации фенола, метанола и формальдегида, температуры фенольных вод первой ступени с

последующим контролем расхода воды и ее подачей в абсорбер для управления процессом и повышения качества очистки и технико-экономических характеристик процесса.

Предлагаемая методика количественного анализа включает в себя: регистрацию спектров комбинационного рассеяния от анализируемого образца с помощью интерференционного спектрометра, позволяющего регистрировать узкие спектральные линии на фоне сплошной засветки высокой интенсивности. В зарегистрированном спектре производится отбор отдельно стоящих полос или групп полос для использования в дальнейшем анализе. Среди отобранных полос производится селекция по полуширине для выделения линий, относящихся к неорганическим компонентам и органическим компонентам (фенолы, амины и т. д.). В первую группу попадают также полосы сильно ассоциированных в растворе группировок органических молекул. В каждой отобранной группе полос производится идентификация анализируемых соединений по набору полос с заранее известными положениями и соотношениями интенсивностей. На этом этапе используется стандартный поисковый алгоритм решения обратных задач [4,5].

Использовался полианилиновый сенсор селективно чувствительный к присутствию в растворе анилина и его замещенных. Для придания полимеру фенольной функции полианилин модифицируется парааминофенолом сополимеризацией анилина с парааминофенолом из раствора в ацетонитриле при потенциале 2,5 в. Для каждого идентифицированного с достаточно большой вероятностью компонента производится количественный анализ по интегральной интенсивности соответствующей группы аналитических полос.

Для обеспечения максимально экономичных и безаварийных режимов технологии (растворения фенол-метанол- формальдегидной газовой смеси в воде, благоприятного протекания процессов биологической очистки на первой и второй ступенях, расхода воды...) в экспериментальных исследованиях выполнялся функциональный контроль с применением методов обработки полученных данных [6].

Схема контроля и управления технологией воздухоочистки представлена на рис. 1

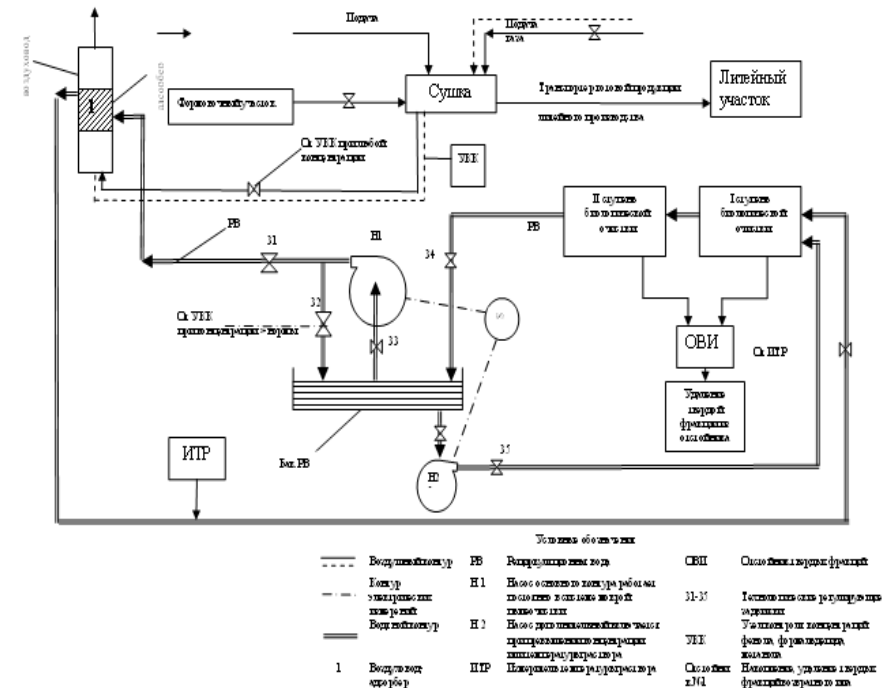


Рис. 1 – Технологическая схема контроля и управления технологией очистки воздуха от фенола, формальдегида и метанола

Алгоритм обработки данных контроля технологии и соответствующие управляющие воздействия при этом показаны на рис. 2.

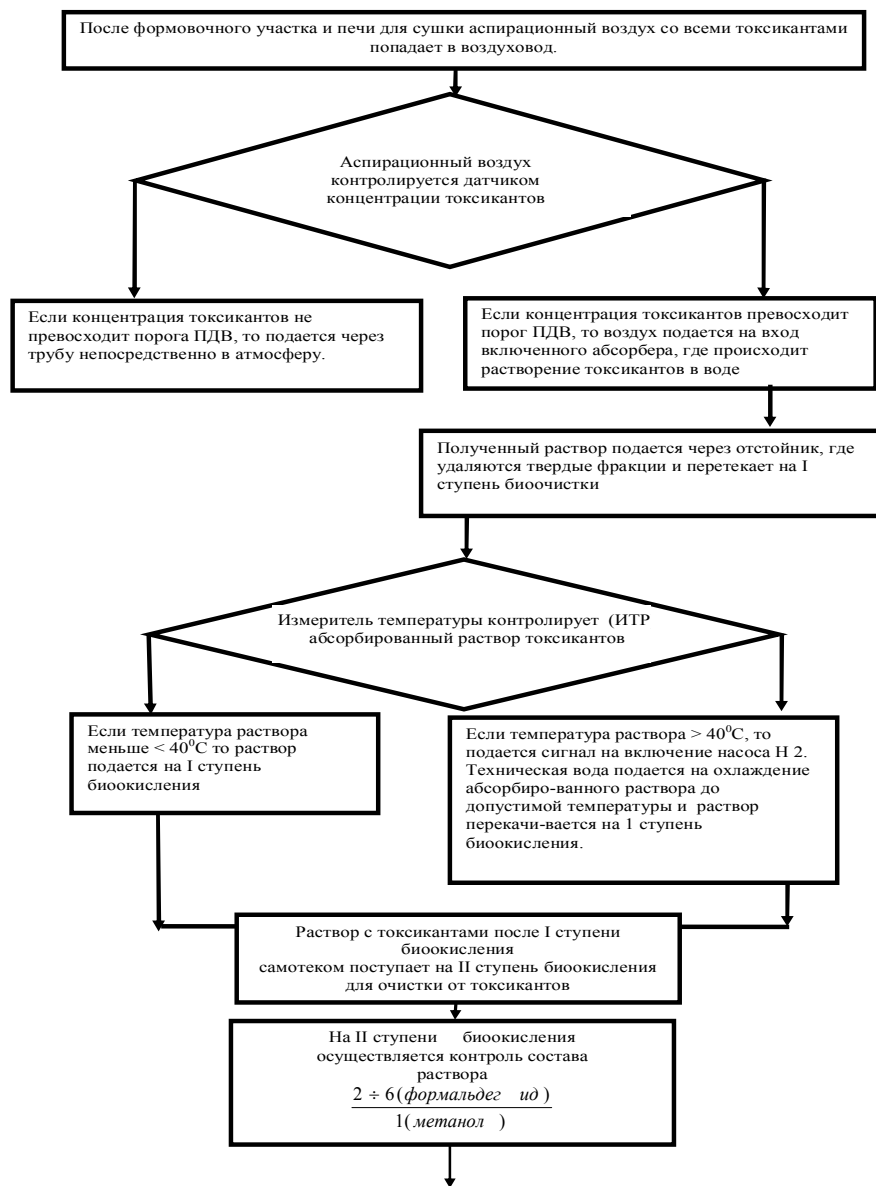


Рис. 2 – Алгоритм управления и контроля технологии воздухоочистки от фенола, формальдегида и метанола

Вывод. Таким образом, при выполнении вышеуказанных условий формулы полезной модели, рационально организованного контроля и управления процессом воздухоочистки достигнуты желаемые показатели очистки воздуха, благодаря которому можно одновременно качественно и экономично очищать воздух от фенола, формальдегида и метанола. Способ также дает существенные преимущества по энергосбережению, экономическим и экологическим показателям.

Список литературы: 1. Любимова Н.А., Костенко В.Ф. Процесс очистки сточных вод предприятий электротехнической промышленности / Н. А. Любимова, В. Ф. Костенко // Башкирский экологический вестник «Экология», Уфа: №2(35), 2013, С. 59-63. 2. Ф.Мейнк Очистка промышленных сточных вод / Ф. Мейнк // Л.: ГН-ТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1993. 648 с.3. Патент Украины №60181. Спосіб видалення із аспіраційного повітря метилового спирту, формальдегіду та фенолу / Костенко В.Ф., Любимова Н.О., Юрченко В.О. – Опубл.10.06.2011. Бюл № 11, 11 с. 4. Любимова Н.А., Костенко В. Ф. Функциональный контроль процесса удаления фенола и сопутствующих ингредиентов из технологических вод после абсорбционной очистки аспирационного воздуха литейных участков промышленных предприятий / Н.А. Любимова, В.Ф.Костенко // Сб. научн. тр. 21 Межд. науч-технич. конф. Харьков, 2013. С 206. 5. Рихтер Л.А., Волков Е.П., Покровский В. Н. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. / Л.А. Рихтер, Е. П. Волков, В.Н.Покровский // М.: Энергоиздат, 1981, 295 с. 6. Любимова Н. А. Функциональный контроль отходов энергетических предприятий / Н.А. Любимова // Сб. научн. тр. 21 Межд. науч-технич. конф. Харьков, 2013. С 259. 7. Большевичев А. Д. Функциональный контроль / А. Д. Большевичев // Измерительная техника. – 1992. - №10. С.15 – 17.

Надійшла до редколегії 13.11.2013.

УДК [658.316.12:547.562.1]:621.3

Контроль и управление технологией воздухоочистки предприятий электротехнической промышленности / Артих С.Ф., Любимова Н. А. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №. 59 (1032). – С.3-11. Бібліогр.: 7 назв.

В даній роботі запропонована схема контролю та керування системою повітря очищування підприємств енергетичної промисловості від композиції фенолу, формальдегіду та метанола за допомогою 2-ступеневої біотехнології.

Ключові слова: контроль, керування, повітряочищування, фенол, формальдегід, метанол, біотехнологія.

In this article model for control and management for system of air cleaning of energetic industry plants is proposed.

Keywords: control, management, biotechnology, system of air cleaning.

С.Ф. АРТЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А.П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук., проф. НТУ «ХПИ»;
И.А. БАЙ, зам. начальника ЭТО, ПАО «Укрэнергопроект», Харьков;
Е.Е. ГОНЧАРОВА, инженер, ПАО «Укрэнергопроект», Харьков

РАЦИОНАЛЬНАЯ ГЛАВНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ГЭС – ЗАЛОГ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ СТАНЦИИ

Проведен анализ главных схем электрических соединений украинских и зарубежных гидроэлектростанций, выявлены основные сходства и отличия в применяемых схемах на различном напряжении и намечены дальнейшие направления их исследований.

Ключевые слова: главная схема электрических соединений, гидроэлектростанция, надежность, экономичность.

Введение. Несмотря на то, что сегодня в энергетическом балансе Украины гидроэнергетика занимает всего 9% общего производства электроэнергии, ее роль трудно переоценить. Гидроэлектростанции крайне необходимы энергетической системе страны, для которой характерны несбалансированность структуры генерирующих мощностей, недостаток регулирующих ресурсов мощностей и частоты. Увеличение мощности АЭС приводит лишь к усугублению данной проблемы.

Установленная мощность всех ГЭС Украины составляет 4,7 млн. кВт, 98 процентов которой приходится на гидроэлектростанции Днепроовского и Днестровского каскадов. Гидроагрегаты ГЭС и ГАЭС широко используются для работы в пиковых режимах и в режимах покрытия ночных провалов нагрузки.

В энергосистеме Украины вторичное регулирование частоты выполняется шестью агрегатами Днепроовской ГЭС-1 суммарной мощностью 432 МВт. Из расчета максимума потребления в 32 ГВт диапазон вторичного регулирования должен составлять 1450-1500 МВт [1]. Таким образом становится очевидным тот факт, что от надежности работы ГЭС зависит надежность работы системы в целом.

Надежность работы ГЭС в значительной степени зависит от правильности выбора схем выдачи мощности в энергосистему. Несмотря на то, что вопросам проектирования главных схем электрических соединений посвящено достаточно много научных работ, [2-4], вопрос создания такой оптимальной схемы для каждой

© С. Ф. Артюх, А. П. Лазуренко, И. А. Бай, Е. Е. Гончарова, 2013

проектируемой станции остается актуальным до сих пор. Поэтому сравнительный анализ главных схем электрических соединений различных ГЭС является актуальной задачей,

Целью статьи является изложение сравнительного анализа главных схем электрических соединений украинских и зарубежных ГЭС с точки зрения их надежности и экономичности и поиск наиболее рациональных из них. Анализ проведен путем обобщения и систематизации имеющейся в распоряжении авторов информации, выявления недостатков и преимуществ отдельных схем, которые влияют на надежность работы энергетической системы в целом.

Основная часть. Опыт проектирования электрической части ГЭС показал, что разработка главных схем электрических соединений станции связана с учетом большого количества внутренних и внешних факторов. При построении этих схем решаются вопросы количества и типов основного силового оборудования (гидрогенераторов, основных повышающих трансформаторов, аппаратуры высокого напряжения и др.), необходимости сборных шин на том или ином напряжении, способ питания собственных нужд, нужный уровень степени автоматизации и т.п. Большое влияние на проектантов оказывает опыт работы уже существующих ГЭС.

При решении основных вопросов, касающихся проектирования электрической части ГЭС, необходимо, в первую очередь, выполнить основные требования относительно главных схем электрических соединений, таких как, надежность, экономичность, оперативная гибкость, удобство эксплуатации, экологическая чистота, автоматичность схемы, компактность и унифицированность [5 с. 13]. Учитывается и то, что главная схема электрических соединений ГЭС должна быть выполнена так, чтобы обеспечивать при авариях или ревизиях системы или секции шин, или другого какого-либо участка схемы, выдачу полной мощности ГЭС.

В некоторых случаях разрешается сохранение не менее 50 процентов генерируемой мощности без нарушения устойчивости энергосистемы. В случаях, когда от ГЭС питаются ответственные потребители или, если ревизия любого участка схемы не может быть проведена во время планового ремонта, требуется предусматривать такую схему, чтобы обеспечивать, по возможности, выдачу максимальной мощности.

Каждая главная схема должна быть проанализирована с привлечением методов математической статистики и теории вероятностей, при этом обычно намечается и рассматривается несколько вариантов такой схемы, лучший из которых выбирается по результатам сравнения основных ее показателей, и, в первую очередь,

надежности и экономичности. При выборе схем РУ следует ориентироваться на типовую сетку схем коммутации для ГЭС и ГАЭС [5 с.152].

Все эти рекомендации чрезвычайно важны, так как на сегодняшний день в Украине проектируются и строятся две ГАЭС и около 50 мини ГЭС., а кроме того, украинские специалисты выполняют проекты и заказы для многих ГЭС, размещенных за границей. В первую очередь авторы проанализировали главные схемы электрических соединений украинских ГЭС. Их систематизация и результаты анализа представлены в таблице.

Таблица – Схемы распределительных устройств украинских ГЭС

Название станции	Схема РУ, используемая в классе напряжения, кВ		
	110	150	330
Киевская ГЭС	блок – линия	–	–
Киевская ГАЭС	–	блок – линия	–
Кременчугская ГЭС	–	две системы сборных шин с обходной	две системы сборных шин с обходной
Днестровская ГЭС-1	4/3	–	3/2
Днепрогэс-1	–	одна секционированная система шин с обходной	треугольник
Днепродзержинская ГЭС	–	блок-линия	–
Днепрогэс-2	–	блок-линия	–
Каховская ГЭС	–	одна секционированная система шин с обходной	–
Каневская ГЭС	две системы сборных шин с обходной	–	четырёхугольник

Проведенный анализ показал, что на напряжении 110 - 150 кВ на украинских ГЭС наиболее часто применяются схемы блок-линия, две рабочие системы шин с обходной, одна рабочая система шин с обходной. Перечисленные схемы являются типовыми на данном напряжении. В случае Днестровской ГЭС, применение схемы 4/3 на напряжении 110 кВ приводит к удорожанию схемы и повышению

надежности, улучшению оперативной гибкости, что при достаточной аргументации является допустимым. На напряжении 110-150 кВ каждая из проанализированных электростанций имеет оптимальную схему РУ. Например, схема ОРУ 110 кВ Киевской ГЭС - блок-линия. К РУ подключаются восемь присоединений - четыре трансформатора и четыре линии. Поскольку ЛЭП не имеют резервирования, наиболее рациональными схемами РУ является блок-линия и две рабочие системы шин с обходной. Вторая схема требует значительных капиталовложений и значительной территории, а при условии, что на РУ установлены современные элегазовые выключатели и длина ЛЭП к подстанции «Вышгород» незначительна, привлекательность схемы блок- линия однозначна. К тому же данная схема полностью соответствует требованиям надежности.

Анализ схем РУ 330 кВ украинских станций показал, что все схемы РУ кроме Кременчугской ГЭС, соответствуют современным требованиям проектирования. Что касается РУ 330 кВ Кременчугской ГЭС, то оно выполнено по схеме « две рабочие системы шин с обходной». При проектировании РУ данной станции действовали другие нормы, согласно которым на напряжении 330 кВ разрешалось применение схемы две рабочие системы шин с обходной. При реконструкции станция схема не была изменена из-за ограниченности территории.

Схемы главных электрических соединений ГЭС стран постсоветского пространства запроектированы по единым нормам с украинскими станциями, а следовательно, являются такими же. Так, на напряжении 220 кВ использованы схемы четырехугольника (Нижегородская ГЭС, ГЭС Мтквари (Грузия)), одна секционированная система шин с обходной (Красноярская ГЭС, Волжская ГЭС), «мостик» (Майнская ГЭС), две рабочие системы шин (Новосибирская ГЭС). На напряжении 500 кВ применены схемы 4/3 (Саяно-Шушенская ГЭС), 3/2 (Волжская ГЭС), и 2/1 (Красноярская ГЭС).

Для ГЭС США и Канады характерна передача больших мощностей на относительно большое расстояние и этим они схожи с ГЭС бывшего СССР.. Поэтому, при построении схем электропередачи в целом и главных схем электрических соединений ГЭС, решающее значение имеют вопросы сохранения устойчивости энергосистем.

На высшем напряжении на РУ ГЭС в США и Канаде предпочитают применять схемы, которые обладают высокой эксплуатационной надежностью, т.е. схемы с многократным присоединением (полуторные или двойные) В США на ГЭС с напряжениями 110 - 400 кВ одинаково часто применяются такие схемы РУ, как одна рабочая система шин с обходной , полуторная схема и

схемы «многоугольников». Так, на ГЭС Барнхарт Айленд, которая имеет два РУ (110 кВ и 220 кВ), на обоих запроектированы схема 3/2. Для повышения надежности схем с одной системой шин в США применяется секционирование шин двумя последовательно соединенными выключателями. В отличие от украинских ГЭС, в США не применяется схема две рабочие системы шин с обходной.

Главные схемы электрических соединений ГЭС Канады аналогичны тем, которые применяются в США. Например, все РУ 361 и 735 кВ ГЭС, расположенных на реках Маникуаган и Утард, запроектированы со схемами «многоугольников». При проектировании подземной ГЭС в Канаде мощностью 5300 МВт была применена схема 4/3 на напряжении 735 кВ.

Схемы РУ ГЭС США являются надежными и гибкими (кольцевые, 3/2, 2/1) запроектированы по принципу простоты эксплуатации, поэтому не применяется обходная система шин в схеме две рабочие системы шин. Часто применяются кольцевые схемы, хотя экономически подтверждено, что при количестве присоединений пять и выше, стоимость такой схемы выше, чем у схемы одна система сборных шин.

Как показывает практика проектирования европейских ГЭС, при отсутствии необходимости передачи мощности на большие расстояния, на напряжении 110 - 400 кВ часто применяются простые схемы, такие как одна секционированная система шин с обходной и шины - линия, с передачей мощности до ближайшей узловой подстанции.

При выборе главных схем электрических соединений в Англии, наряду с экономичностью важное значение придается вопросам продольного секционирования схем с большим числом присоединений с помощью разъединителей. Большой популярностью в Англии получила схема с двумя системами рабочих шин и обходной системой с двойным продольным секционированием шин разъединителями. При этом значительно увеличивается количество разъединителей и систем электромагнитной и механической блокировки.

В таких европейских странах как Ирландия, Бельгия, Норвегия, Словения, Франция и Швеция не разрешается потеря более одного присоединения на РУ (блока или ЛЭП), в Австрии, Дании, Испании, Италии, Нидерландах - не разрешается потеря более двух присоединений. Поэтому, схемы РУ ГЭС должны строго соответствовать предъявляемым требованиям надежности. Часто применяются кольцевые схемы, схемы блок - линия, два выключателя на присоединение и двойное секционирование, что приводит к значительному удорожанию схем.

Вместе с тем, проведенный анализ схем показал и некоторое отличие в подходах к их проектированию за рубежом. Так, в США при проектировании главных схем электрических соединений ГЭС замечается стремление к уходу от схем с обходными шинами, что, по видимому объясняется более высокой степенью надежности устанавливаемых выключателей и более длительным их межремонтным сроком. Кроме того, не редки случаи применения схем «многоугольников» с очень большим количеством углов (8 и больше), в то время как в практике проектирования ГЭС Украины такие схемы вообще отсутствуют. На зарубежных ГЭС очень часто встречаются схемы с двумя системами сборных шин и двумя выключателями между ними, между которыми включается присоединение. В отечественной практике такие схемы крайне редки.

Выводы. Для выбора рациональной главной схемы электрических соединений недостаточно руководствоваться только «внешними» преимуществами схем, такими как простота, экономичность, каждая станция требует индивидуального анализа и точных расчетов, подтверждающих правильность выбора схемы. На данный момент накоплен значительный опыт эксплуатации наиболее часто используемых главных схем ГЭС, однако, необходимо дальнейшее изучение возможности наиболее эффективного использования схем РУ на разных классах напряжения, и в первую очередь, это касается схем зарубежных ГЭС.

Список литературы: 1. Кириленко О.В. Проблеми з забезпечення надійної роботи ОЕС України в умовах реформування енергетики /О.В. Кириленко// Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – №3. – с. 135–141 2. Двоскин Л.И. Схемы и конструкции распределительных устройств.М., «Энергия»,1974.224с, с ил. 3. Двоскин Л.И. Схемы электрических соединений мощных тепловых элек-тростанций..М-Л.,Госэнергоиздат,1963, 208с, с ил. 4.Неклепаев Б.Н. О допустимом числе присоединений в распределительных устройствах со сборными шинами / Б.Н. Неклепаев, В.И. Трубицын // Электрические станции . – 2000. – №3. – с. 40 5. Балаков Ю.Н. Проектирование схем электроустановок / Балаков Ю.Н. Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. – М. : Издательство «МЭИ», 2006. – 288 с

Надійшла до редколегії 20.09.2013

УДК 621.22

Рациональная главная схема электрических соединений ГЭС – залог надежной работы станции / Артюх С.Ф., Лазуренко А. П., Бай И. А., Гончарова Е. Е. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №. 59 (1032). – С.13 - 19. Бібліогр.: 5 назв.

Проведений аналіз головних схем електричних з'єднань українських та зарубіжних гідроелектростанцій, показані головні спільні та різні риси в схемах що використовуються на різних напрузі намічених подільний напрямок їх досліджень.

Ключові слова: надійність, економічність, гідроелектростанція, головна схема електричних з'єднань.

In this article model for control and management for system of air cleaning of energetic industry plants is proposed.

Keywords: reliability, economical, biotechnology, main scheme of electrical connections

УДК 621.315 (519.2)

А. Н. БОЙКО, асп., НТУ «ХПИ»

ДРЕЙФ ВО ВРЕМЕНИ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НЕЭКРАНИРОВАННЫХ И ЭКРАНИРОВАННЫХ СЕТЕВЫХ КАБЕЛЕЙ

Представлены временные ряды измеренных значений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов сетевых кабелей категории 5е. Экспериментально установлено, что разброс значений тангенса угла диэлектрических потерь витой пары экранированного кабеля составляет более двух порядков. Проанализированы причины разброса диэлектрических параметров и даны рекомендации относительно временных интервалов при измерении диэлектрических параметров.

Ключевые слова: витая пара, тангенс угла диэлектрических потерь, металлический экран, статическая электризация, методика измерений.

Введение. Эволюция технологий в сторону высоких частот делает актуальной проблему электромагнитной совместимости для электрических и электронных устройств, в том числе и для информационных кабелей. Данная проблема имеет два аспекта — влияние собственных излучений систем на работу других устройств и их уязвимость от внешних электромагнитных помех.

Кабели на основе витых пар составляют свыше 80% применяемых кабелей в структурированных кабельных системах (СКС). Как правило, они обеспечивают передачу информации в пределах этажа и относятся к горизонтальной подсистеме СКС. Наиболее популярным решением является использование неэкранированных витых пар [1 – 3].

Кабели являются одновременно источником и приемником электромагнитных помех. Как источник, - кабель передает шумы на другое сетевое оборудование и действует как антенна, излучающая помехи. Как приемник, - кабель улавливает электромагнитные помехи, излучаемые другими источниками. Применяя экранированные кабели, удастся снизить уровень как излучаемых, так и принимаемых электромагнитных помех.

Анализ литературных источников показывает [4 – 6], что для экранированных кабелей отмечаются более высокие значения активных сопротивлений проводников и рабочих емкостей, а значит и больший коэффициент затухания в сравнении с неэкранированными кабелями той же категории. Причина связана с влиянием экрана на параметры передачи, в частности, эффектом близости. Коэффициент затухания для высокочастотного диапазона определяется не только активным сопротивлением проводников R , рабочей емкостью C , но и активной

© А. Н. Бойко, 2013

проводимостью изоляции G , а значит и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ [7]:

$$\begin{aligned} \alpha &= 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{\omega C \operatorname{tg}\delta}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \\ &= 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{\omega \operatorname{tg}\delta}{2} \sqrt{CL} \right) = 8,69 \sqrt{C} \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{1}{L}} + \frac{\omega \operatorname{tg}\delta}{2} \sqrt{L} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где R – активное сопротивление витой пары (сумма сопротивлений прямого и обратного проводников шлейфа), Ом/м;

C – рабочая емкость пары, Ф/м;

L – общая индуктивность пары, Гн/м;

G – активная проводимость изоляции, См/м;

$\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь конструкции.

При этом тангенс угла диэлектрических потерь учитывает потери не только в самой изоляции проводников витой пары, но и в рядом расположенных элементах конструкции: защитной оболочке (для неэкранированной пары), скрепляющей обмотке (для экранированного кабеля).

Необходимо отметить, что как в неэкранированных, так и в экранированных кабелях присутствует ряд границ раздела, на которых происходит накопление как *поверхностного, так и трибозаряда* [8 – 11]. Очевидно, что эти заряды будут приводить к флуктуациям емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Возникает вопрос: насколько стабильны во времени электрические параметры витой пары неэкранированного и экранированного кабеля?

Цель статьи – сравнить результаты наблюдений временного дрейфа емкости и тангенса угла диэлектрических потерь витой пары неэкранированного и экранированного кабеля.

Объекты исследований.

Образцы неэкранированного (бухта длиной порядка 90 метров) и экранированного (длиной 25 метров) кабеля категории 5е. В каждом кабеле по 4 витые пары. В качестве тестируемой выбрано по одной паре. Проводники неиспользуемых пар с двух сторон не имеют выступающих медных жил. Неэкранированный кабель имеет достаточно плотную конструкцию: защитная оболочка на основе поливинилхлоридного пластика плотно прилегает к сердечнику кабеля (четыре скрученные пары).

В экранированном кабеле сердечник обмотан скрепляющей политетрафторэтиленовой пленкой, поверх которой продольно наложен алюминиевый экран и дренажный медный проводник.

Методика проведения измерений.

Измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь каждого из образцов выполнены на частоте 120 Гц в течение около 1 часа с помощью цифрового измерителя RLC E7-22. Условия измерений (температура, влажность) и подключение образцов – идентичны. В режиме реального времени результаты измерений с помощью программного обеспечения записывались в память компьютера.

Результаты измерений образцов кабелей.

На рис. 1 - 5 приведены временные ряды емкости и тангенса угла диэлектрических потерь тестируемых витых пар. Для удобства анализа результатов измерений временные зависимости параметров представлены в разных масштабах: равномерном, полулогарифмическом и двойном логарифмическом.

Анализ временных зависимостей для неэкранированного кабеля показывает, что динамика изменения параметров – аналогична. Так, при временах наблюдения от 1 до 20с параметры не изменяются, в диапазоне времен 400 – 500с наблюдается характерный максимум, после которого следует уменьшение и дальнейший рост.

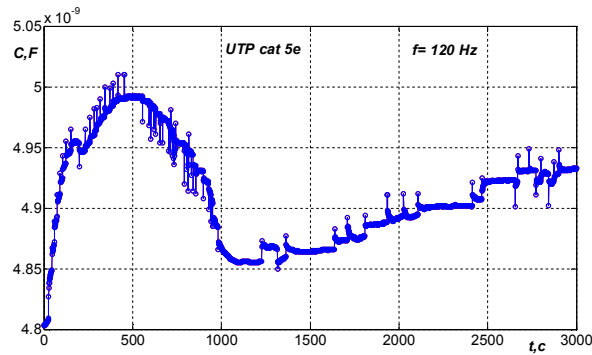
Для экранированного кабеля динамика изменения параметров – совершенно разная (см. рис. 3). Так, для емкости при временах наблюдения от 1 до 1000с флуктуации не существенны. При временах измерения более 1000с наблюдается скачок с ростом флуктуаций. Для тангенса угла диэлектрических потерь характерен существенный разброс измеряемых значений: более 2-х порядков (рис.4). Флуктуации потерь в неэкранированном кабеле, практически, на порядок меньше (см. рис.5 и рис.6).

На рис.6 нижняя сторона прямоугольника соответствует 25-процентной точке, верхняя – 75-процентной. Горизонтальная линия внутри прямоугольника – медиане, верхняя и нижняя горизонтальные линии – минимальному и максимальному элементу выборки соответственно.

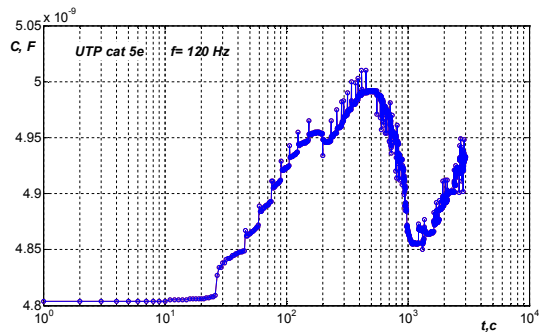
В образцах обследованных кабелей наблюдается постоянный контакт материалов конструктивных элементов, так как есть возможность свободного перемещения (особенно в образце экранированного кабеля, у которого конструкция менее плотная). На контактирующих поверхностях происходит перенос свободных зарядов и, как следствие, накопление трибозаряда, появление контактной разницы потенциалов – *собственных шумов*. За счет перераспределения электронов на поверхностях контактирующих материалов возникает двойной электрический слой -

дополнительная электрическая емкость, которая существенно зависит от типа материала.

В случае неэкранированного кабеля категории 5е после механического воздействия на кабель происходит изменение одного из ключевых параметров передачи данного кабеля, - электрической емкости. Емкость приобретает максимальные значения на 500-ой секунде измерений, после чего значения уменьшаются и начинают снова возрастать, но уже менее резко.



а

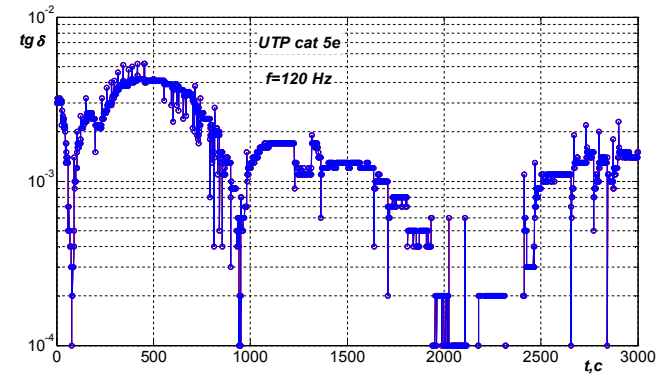


б

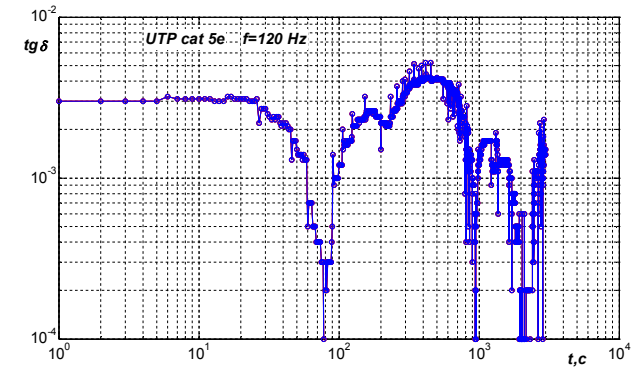
Рис.1 – Временной дрейф емкости неэкранированной витой пары образца неэкранированного кабеля категории 5е: а – равномерный масштаб; б – полулогарифмический

Наблюдая за изменением емкости для данного кабеля, можно соотнести изменения этого параметра с изменениями тангенсом угла диэлектрических потерь. Одновременно с ростом электрической емкости полиэтилена, который связан с релаксацией свободных электрических зарядов, наблюдается и рост тангенса дельта, максимальные значения

которого приходится на промежуток времени около 500-ой секунды измерений.



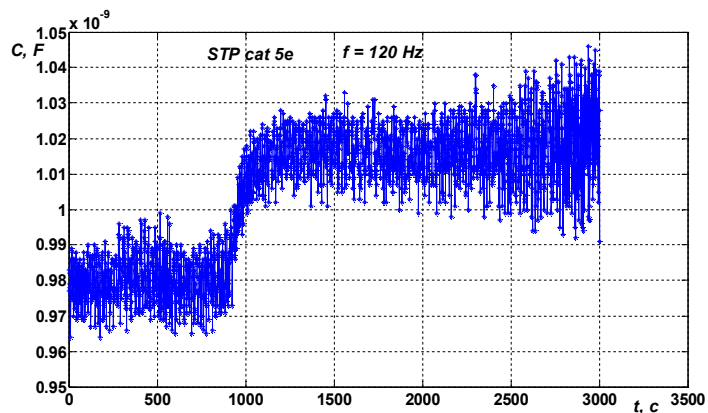
а



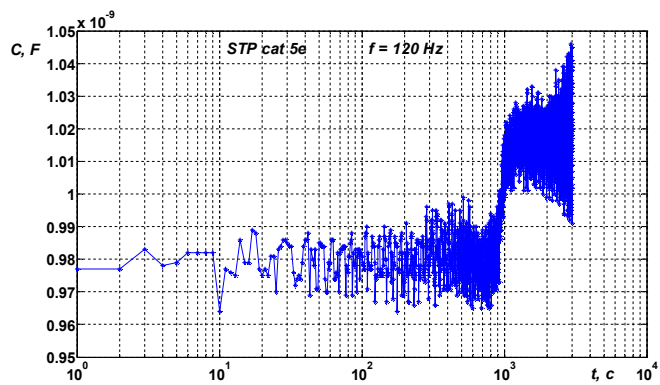
б

Рис.2 – Временной дрейф тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированной витой пары образца неэкранированного кабеля категории 5е: а – полулогарифмический масштаб; б – двойной логарифмический масштаб

Для неэкранированной витой пары наблюдаются заметно большие флуктуации электрической емкости на малых промежутках времени. При этом практически на всем промежутке времени (3000 секнд), как амплитуда изменений значений емкости, так и сами эти значения, только возростали.



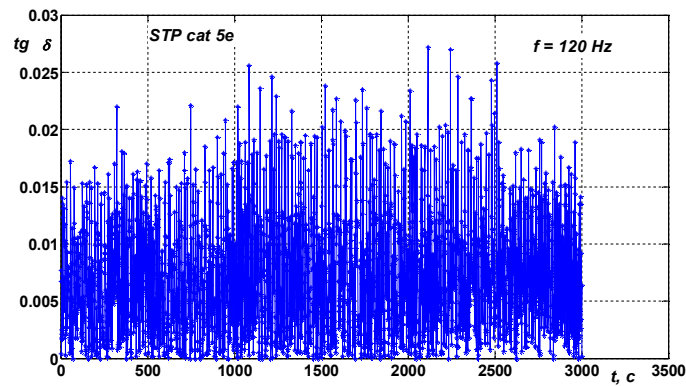
а



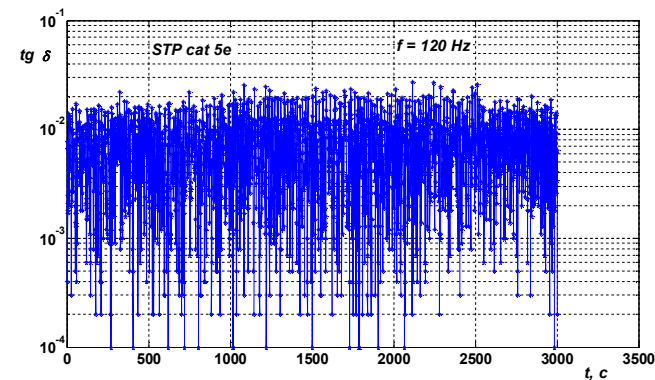
б

Рис.3 – Временной дрейф емкости неэкранированной витой пары образца экранированного кабеля категории 5e: а – равномерный масштаб; б – полулогарифмический

В случае неэкранированной витой пары измерения тангенса дельта в промежутке времени, равном нескольким секундам, может дать различие значений этого параметра, равное двум порядкам. В экранированной витой паре не происходит таких стремительных изменений этого параметра.



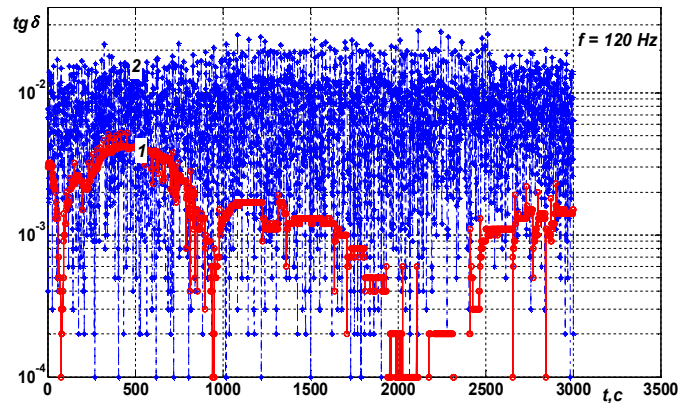
а



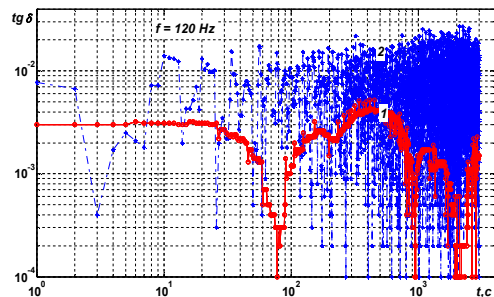
б

Рис.4 – Временной дрейф тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированной витой пары образца экранированного кабеля категории 5e: а – равномерный масштаб; б – полулогарифмический

Таким образом, сравнивая временной дрейф тангенса угла диэлектрических потерь витой пары в экранированном и неэкранированном исполнении, можно сделать вывод, что наличие металлического экрана определенным образом стабилизирует изменения этого параметра. Наличие экрана становится особенно заметным при длительном измерении тангенса угла диэлектрических потерь данных кабелей (рис.5б).



а



б

Рис.5 – Сравнение временного дрейфа тангенса угла диэлектрических потерь витой пары в неэкранированном (1) и экранированном (2) образцах кабеля категории 5e: а –полулогарифмический масштаб; б – двойной логарифмический

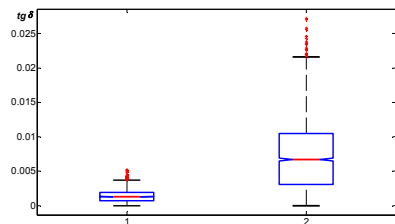


Рис.6 – Статистический разброс значений тангенса угла диэлектрических потерь витой пары в неэкранированном (1) и экранированном (2) образцах кабеля

Разброс измеряемых диэлектрических параметров для одного и того же образца кабеля в одних и тех же условиях проведения измерений обусловлен множеством случайных факторов, которые всегда присутствуют и оказывают воздействие на результаты обследований. Значительный разброс $\text{tg } \delta$ в процессе длительных наблюдений (1 часа) не может быть связан только со статистическими факторами. Решающую роль играют особенности конструкции и применяемых материалов. В сетевых кабелях применяется высококачественная полиэтиленовая изоляция, обладающая также высокими трибоэлектрическими свойствами. Но в экранированном кабеле трибоэффект усиливается наличием политетрафторэтиленовой скрепляющей пленки и общего алюминиевого экрана. Политетрафторэтиленовая пленка имеет более высокие значения плотности поверхностных ловушек [8]. Этим, очевидно, объясняется существенный разброс измеряемых значений тангенса угла диэлектрических потерь.

В обследованных конструкциях кабелей за счет наличия трибозаряда возникают собственные шумы (помехи), которые и являются в значительной степени источником дрейфа во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Заключение.

Дрейф во времени диэлектрических параметров оказывает влияние на коэффициент затухания сетевых кабелей, что особенно важно для высокочастотных приложений, т.к. потери энергии в изоляции становятся соизмеримыми с потерями в проводниках (в полиэтиленовой изоляции потери слабо зависят от частоты).

Экспериментально установлено, что плотность конструкции существенно влияет на дрейф диэлектрических параметров кабелей.

Скрепляющая лавсановая обмотка недопустима в конструкции экранированных кабелей, т.к. приводит к появлению трибозарядов и существенному разбросу тангенса угла диэлектрических потерь (более, чем два порядка).

Для тангенса угла диэлектрических потерь экранированного кабеля со скрепляющей лавсановой обмоткой достаточно сложно выбрать временной интервал для измерений.

При обследованиях по емкости измерения необходимо проводить сразу же после подключения образца экранированного кабеля к измерительному прибору. В случае неэкранированного – в первые секунды или по прошествии значительного времени (больше, чем постоянная времени саморазряда изоляции), по истечении которого трибозаряды «успокаиваются».

Список литературы: 1. Семенов А. Б. Основные тенденции развития техники СКС // Журнал сетевых решений / LAN, август 2007, том 13, № 8 (133), с. 56–65. 2. Пешков И.Б.

Кабели структурированных кабельных систем и проблемы информационной безопасности / И.Б. Пешков // Кабели и провода. – М., №2(309). – 2008. 3. Семенов А. Б. Структурированные кабельные системы промышленного назначения // Мир связи. Сопест. 2007, № 7, с. 166–169. 4. Беспрозванных А.В. Влияние скрутки сердечника на параметры передачи сетевых кабелей / Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, N7. – 2004. – С.82 – 87. 5. Беспрозванных А.В. Оптимизация конструкции сетевых кабелей по коэффициенту затухания в зоне допусков геометрических размеров параметров передачи / Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г // Электротехника і Електромеханіка. – 2004. 6. Беспрозванных Г.В. Эффективность экранирования витых пар / Г.В.Беспрозванных, А.М.Бойко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №41. 7. Беспрозванных Г.В. Обгрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем / Г.В.Беспрозванных, А.М.Бойко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип.2, Т.1. 8. Беспрозванных А.В. Термо-грибо-электрический потенциал для оценки старения полимерной изоляции / А.В.Беспрозванных // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – №27. – 2009. – С. 16 – 24. 9. Беспрозванных Г.В. Экспериментальне визначення трибо електричного потенціалу в неекранованих та екранованих кабелях / Г.В.Беспрозванных, А.М.Бойко // Электротехника і Електромеханіка. – Харків, 2012 р. – № 3, 56 – 60 с. 10. Беспрозванных Г.В. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях / Г.В.Беспрозванных, А.М.Бойко // Тези доповідей ХХ міжнародно-практичної конференції, ч. II (15-17 травня 2012 р., Харків). - Харків, НТУ «ХПІ». – 324 с. 11. Беспрозванных Г.В. Електростатичні процеси в силових кабелях / Г.В.Беспрозванных, А.М.Бойко // Электротехника і Електромеханіка. – Харків, 2013 р. – № 4, 27 – 31 с.

Надійшла до редколегії 09.10.2013

УДК 519.2

Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей

/ А.Н. Бойко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 18–28. – Бібліогр.: 11 назв.

Продемонстровані часові ряди виміряних значень ємності та тангенсу куту діелектричних втрат взірців мережевих кабелів категорії 5е. Експериментально встановлено, що розкид значень тангенсу куту діелектричних втрат виті пари екранованого кабелю становить більш ніж два порядки. Проаналізовані причини розкиду діелектричних параметрів і дані рекомендації стосовно часових інтервалів при вимірюванні діелектричних параметрів.

Ключові слова: вито пара, тангенс куту діелектричних втрат, металевий екран, статична електризація, методика вимірювань.

The time series of measured values of capacity and dielectric loss tangent of the 5-th category network cables were demonstrated. It was experimentally shown that the variation of dielectric loss tangent values of shielded twisted pairs equals to more than two magnitude orders. The reasons of variation of dielectric parameters were analyzed and there were given recommendations related to time intervals of measuring dielectric parameters.

Keywords: twisted pair, dielectric loss factor, metal screen, electrostatic charging, measurement technique.

УДК 621.315

В.О. БОНДАРЕНКО, докт. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»
В.В. ЧЕРКАШИНА, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПІ»
О.В. ТРЕГУБОВА, магістр, НТУ «ХПІ»

ВИБІР ПРІОРИТЕТНОГО НАПРЯМКУ ПРОЕКТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 110 кВ В СУЧАСНИХ УМОВАХ.

В статті представлено передпроектний порівняльний аналіз між традиційними, компактними і самокомпенсуючими повітряними лініями 110кВ в сучасних умовах, що дозволить впровадити в практику проектування повітряні лінії підвищеної пропускної здатності.

Ключеві слова: повітряна лінія, потужність, пропускна здатність.

Вступ. Умови ринку двосторонніх договорів і балансуєчого ринку електроенергії, в яких функціонує електроенергетична галузь України вимагають відповідного переосмислення при створенні наукової платформи в напрямку розвитку електричних мереж. Перспективними змінами в даному напрямку є методологія пошуку раціональної структури при виборі пріоритетного напрямку проектування електромережевих об'єктів, до яких відносяться і повітряні лінії (ПЛ).

Вибір пріоритетного напрямку проектування ПЛ в сучасних умовах пов'язаний з необхідністю аналізу альтернативних варіантів з урахуванням економічних критеріїв і технічних аспектів, що і обумовлює специфіку завдання при передпроектному порівняльному аналізі.

Аналіз останніх досліджень і літератури. Транспортування потужності ПЛ являється найдешевшим способом передачі та розподілу електричної енергії, а при виконанні міжсистемних зв'язків практично єдиним [1].

Ефективність транспортування потужності ПЛ визначається в першу чергу її пропускною здатністю. Вимоги до пропускної здатності постійно ростуть, при цьому засоби її підвищення дуже різні як по ефективності дії, так і за економічними показниками. І на сьогодні вже є нові розробки, що характеризуються різноманіттям технічних рішень [1-3]. Так в енергосистемах країн, які межують з енергосистемами України, успішно експлуатуються компактні повітряні лінії (КПЛ) [2] та керовані самокомпенсуючі повітряні лінії (КСПЛ) [3].

Аналіз літературних джерел показав, що для транспортування потужності в Україні масово застосовуються традиційні ПЛ, які

©В.О.Бондаренко, В.В.Черкашина, О.В.Трегубова. 2013

мають низьку пропускну здатність [4].

Єдиною можливістю збільшення пропускну здатності існуючих електричних мереж являється збільшення пропускну здатності самих ПЛ.

Пріоритетний напрямок, що забезпечує збільшення пропускну здатності електропередач базується на впровадженні в електричних мережах для транспортування потужності таких технічних рішень, як КПЛ і КСПЛ [2 - 4].

Тому при виборі пріоритетного напрямку проектування доцільно виконувати порівняльний аналіз не тільки між собою традиційних ПЛ різних конструкцій, а і КПЛ та КСПЛ з традиційними ПЛ.

Мета досліджень. Провести передпроектний порівняльний аналіз між традиційними, компактними і самокомпенсуючими повітряними лініями 110 кВ з урахуванням сучасних умов, що дозволить впровадити в практику проектування повітряні лінії підвищеної пропускну здатності.

Матеріали дослідження. У загальному випадку вибір пріоритетного напрямку проектування ПЛ, як процедури ухвалення рішення має дві складових - емоційну (імпульсивні рішення) і раціональну. Домінуючою в теорії ухвалення рішень є гіпотеза раціонального, коли емоційна складова не береться до уваги [5].

Т. Саати запропонував мультиплікативну модель, що відноситься до раціональної процедури ухвалення рішення і базується на обчисленні важливості критеріїв, а потім і альтернатив по кожному з обраних критеріїв. Він припустив, що важливість визначається в результаті оцінки експертом, в скільки разів одна альтернатива важливіша за іншу за цим критерієм [6].

Вибір пріоритетного напрямку в проектуванні ПЛ можна представити безліччю альтернатив

$$A = \{a_i\}_{i=1}^n \quad (1)$$

і безліччю критеріїв

$$Q = \{q_j\}_{j=1}^m \quad (2)$$

для оцінки важливості альтернатив.

Кожній альтернативі виставляють оцінки по усій безлічі критеріїв q - оцінка i - й альтернативи по j - му критерію. Ваги порівнюваних об'єктів(спочатку критеріїв, а потім послідовно альтернатив рішення за кожним критерієм) обчислюємо по формулах:

$$w_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m y_{ij}} \quad w_i' = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (3)$$

Важливість альтернативи по кожному з критеріїв визначаються в серії з m процедур попарних порівнянь, в кожній з яких визначаються ваги за критерієм. Потім в співвідношенні (3) значення m - число критеріїв, замінюється на n - число альтернатив.

Кращою вважається альтернатива з найбільшою кількістю важливих критеріїв.

Відповідно до вище викладеного проведено передпроектний порівняльний аналіз традиційних ПЛ з КПЛ і КСПЛ з урахуванням діапазону потужності (P), що передається, для вибору пріоритетного напрямку проектування ПЛ в сучасних умовах.

Результати досліджень представлено в табл. 1 і 2

Таблиця 1 – Результати передпроектного порівняльного аналізу при транспортуванні потужності $P_{min} \leq P_n < 0,5(P_{max} + P_{min})$

Номер альтернативи	Пропускна здатність відн. од.	Відносні витрати на одиницю переданої потужності, відн. од.		Технологічні втрати на транспортування електричної енергії, відн. од.		Конструкція
		120 мм ²	240 мм ²	120 мм ²	240 мм ²	
1	1	3,5	3,93	0,05	0,025	Традиційна ПЛ
2	1,25	2,78	3,11	0,06	0,02	КПЛ
3	1,20	2,88	3,23	0,06	0,029	КСПЛ

Таблиця 2 – Результати передпроектного порівняльного аналізу при транспортуванні потужності $0,5(P_{max} + P_{min}) < P_n \leq P_{max}$

Номер альтернативи	Пропускна здатність відн. од.	Відносні витрати на одиницю переданої потужності, відн. од.		Технологічні втрати на транспортування електричної енергії, відн. од.		Конструкція
		120 мм ²	240 мм ²	120 мм ²	240 мм ²	
1	1	1,75	1,97	0,1	0,05	Традиційна ПЛ
2	1,35	1,29	1,45	0,13	0,067	КПЛ
3	1,40	1,23	1,38	0,14	0,066	КСПЛ

Проведені дослідження показали, що пріоритетним напрямком проектування ПЛ 110 кВ при транспортуванні потужності $P_{min} \leq P_n < 0,5(P_{max} + P_{min})$ являються КПЛ, а при транспортуванні потужності $0,5(P_{max} + P_{min}) < P_n \leq P_{max}$ пріоритетним напрямком є КСПЛ.

Аналіз альтернативних варіантів з урахуванням діапазону потужності (P), що передається, дозволив вибрати пріоритетний напрямок проектування ПЛ 110 кВ в сучасних умовах.

Висновок. Проведено передпроектний порівняльний аналіз між традиційними, компактними і самокомпенсуючими повітряними лініями 110 кВ з урахуванням сучасних умов по методу Т. Саатті, що дозволить впровадити в практику проектування повітряні лінії підвищеної пропускної здатності.

Список литературы: 1. Черемисин Н.М. Стратегия выбора оптимального решения при проектировании воздушных линий электропередачи / Н.М. Черемисин, В.И. Романченко, В.В. Черкашина // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця:ВНТУ.- 2012- №2- С.115 – 118. 2. Александров Г.Н. Перспективные технологии передачи электрической энергии. / Г.Н. Александров // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006.– № 2.– С.17 – 25. 3. Постолатий В.М. Управляемые электропередачи / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова // Труды института энергетики АН Молдовы – 2007 – № 8 (23) – 234 с. 4. Барбаишов И.В. Общая характеристика современных электрических систем и сетей. Учебно-методическое пособие. / И.В. Барбаишов – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 124 с. 5. Ларичев О.И. Теории и методы принятия решений. / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2002. – 392 с. 6. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. / Т.Л. Саати– М.: Из-во ЛКИ, 2008. — 360 с.

*Надійшла до редколегії
08.11.2013.*

УДК 621.315

Вибір пріоритетного напрямку проектування повітряних ліній 110 кВ в сучасних умовах / Бондаренко В.Е., Черкашина В.В., Трегубова Е.В // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2013. - №. – 59 (1032) С. 29 - 32

В статье проведен предпроектный сравнительный анализ между традиционными, компактными и самокомпенсирующими воздушными линиями 110кВ в современных условиях, что позволит внедрить в практику проектирования воздушные линии повышенной пропускной способности.

Ключевые слова: воздушная линия, мощность, пропускная способность.

In the article a pre-project comparative analysis is conducted between traditional, compact and samokompensazion by the air-tracks of 110кВ in modern terms, that will allow to inculcate the air-tracks of enhanceable carrying capacity in practice of planning.

Keywords: air-tracks, power, carrying capacity.

УДК 620.9

А. В. БОРЦОВ, к.т.н., с.н.с., доцент НТУ «ХПИ» ;
Е. И. ПОТОВСКАЯ, инженер 1-й кат. НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАКЛОННОЙ ПРИНИМАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлена методика расчета солнечного излучения безоблачного неба для горизонтально расположенной и наклонной принимающей поверхности. Рассмотрены случаи определения мгновенных и суточных значений солнечного излучения. Приведена оценка полученных результатов.

Ключевые слова: солнечное излучение, склонение, широта, принимающая поверхность, азимут, часовой угол Солнца, показатель ясности.

Введение. Целью нашего исследования является энергообеспечение автономных средств связи и контроля обеспечения безопасной работы высоковольтных воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Для решения данной задачи были предложены несколько способов энергообеспечения, в частности использование солнечных батарей. На сегодняшний день существуют достаточно подробные таблицы интенсивности солнечного излучения для областных центров Украины [1], тем не менее, эти данные не являются достаточными для целей нашей работы, так как ВЛ не проходят по областным центрам, а расположены вдалеке от населенных пунктов. Метод расчета солнечного излучения (СИ) приведенный в данной статье позволяет определять количество СИ приходящее на принимающую поверхность (ПП) расположенную в произвольном месте имея данные широты, азимута, угла наклона ПП и времени года, для которого необходимо провести расчет.

Количество солнечного излучения полученного поверхностью контролируется, в глобальном масштабе геометрией Земли, атмосферной проницаемостью и относительным размещением Солнца. В местном масштабе излучение изменяется из-за наклона поверхности, перспективы и возвышения. При расчете энергии приходящей на конкретную поверхность используют метеорологические данные по солнечному излучению (R_s), так как эти данные получены для горизонтальных поверхностей, они требуют доработки. Для наклонной поверхности общее солнечное излучение состоит из суммы трех

© А.В.Борцов, Е. И. Потовская 2013

компонентов:

1. прямое излучение – часть солнечного излучения, которая не поглощена и не рассеяна в атмосфере, она достигает поверхности непосредственно от Солнца.

2. диффузное излучение – часть солнечного излучения, которая была рассеяна при прохождении его через атмосферу.

3. отраженное излучение – часть солнечного излучения, которая была отражена от земных поверхностей (этот компонент имеет небольшие размеры).

Предлагаемая методика расчета базируется на ранее известных моделях [2], [3], [4] и [5]. Методика расчета состоит из двух этапов:

1. расчет внеземного солнечного излучения (R_u) для заданных угла наклона и азимута;

2. расчет солнечного излучения для безоблачного неба.

Внеземное солнечное излучение в любой момент времени, при дневном свете, это функция угла падения солнечного излучения:

$$R_u = \frac{G_s \cdot \cos(\theta)}{d^2} \quad (1)$$

где G_s – солнечная постоянная (1367 Вт/м²);

d – относительное расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах;

$\cos(\theta)$ – косинус угла падения солнечного излучения относительно нормали к поверхности земли.

Параметр d – это функция дня года, она может быть рассчитана по формуле [4]

$$d^2 = \frac{1}{1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right)} \quad (2)$$

где D – день года.

Полное уравнение для нахождения мгновенного угла падения солнечного излучения на наклонную поверхность [5]

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin S \cdot \sin \omega \quad (3)$$

где δ – склонение Солнца, град.;

φ – широта точки, град.;

S – наклон поверхности, град.;

γ – азимут принимающей поверхности, град. (для принимающей поверхности ориентированной на юг $\gamma = 0^\circ$, для принимающей поверхности ориентированной на восток $\gamma = -90^\circ$; для принимающей

поверхности ориентированной на запад $\gamma = 90^\circ$, для принимающей поверхности ориентированной на север $\gamma = \pm 180^\circ$);

ω – часовой угол Солнца, град. ($\omega = 0$ в солнечный полдень, отрицательный утром и положительный после полудня).

Склонение Солнца рассчитывается исходя из формулы [5]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (284 + D) \right] \quad (4)$$

В случае горизонтальной принимающей поверхности ($S = 0$), а азимут не существен уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\cos \theta_g = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (5)$$

где, $\cos \theta_g$ – косинус угла падения солнечного излучения относительно нормали к горизонтальной поверхности.

Для получения внеземного солнечного излучения за определенный период проинтегрируем уравнение (3) по ω :

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta d\omega = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S \cdot (\omega_2 - \omega_1) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot (\omega_2 - \omega_1) + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin S \cdot (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \quad (6)$$

Если брать для ω_1 и ω_2 моменты начала и окончания солнечного дня можно рассчитать, таким образом, количество внеземного солнечного излучения за сутки.

$$\sin \omega_1 = \frac{a \cdot c - b \cdot \sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}; \quad (7)$$

$$\sin \omega_2 = \frac{a \cdot c + b \cdot \sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}; \quad (8)$$

где a , b , c – константы для наклона, широты и азимута принимающей поверхности;

$$a = \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S - \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S; \quad (9)$$

$$b = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma; \quad (10)$$

$$c = \cos \delta \cdot \sin S \cdot \sin \gamma. \quad (11)$$

Для горизонтально расположенной принимающей поверхности ω_1 и ω_2 равны $-\omega_s$ и ω_s , где $-\omega_s$ это часовой угол солнца во время восхода, а ω_s это закатный часовой угол рассчитывается по формуле [5]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad (12)$$

Солнечное излучение чистого неба (R_c), его мгновенное значение рассчитывается:

$$R_c = K_{Bo} \cdot R_u + (f_{ia} \cdot K_{Do} + \alpha \cdot (1 + f_i) \cdot [K_{Bo} + K_{Do}]) \cdot R_{ug}, \quad (13)$$

где K_{Bo} – показатель ясности для прямого излучения;
 K_{Do} – показатель ясности для рассеянного излучения;
 f_{ia} – фактор «небесного вида» (sky-view) для анизотропного рассеянного излучения;
 f_i – фактор «небесного вида» для изотропного рассеянного излучения [6];

$$f_i = 0,75 + 0,25 \cdot \cos S - \frac{0,5}{\pi} \cdot S \quad (14)$$

R_{ug} – взнесенное СИ на горизонтальную поверхность, Вт·ч/м²;

$$R_{ug} = \frac{G_s \cdot T}{\pi \cdot d^2} \cdot (\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \omega_s + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_s) \quad (15)$$

где T – время освещенности, ч.

Показатель ясности для прямого СИ [7]:

$$K_{Bo} = 0,98 \cdot \exp \left(\frac{-0,00146 \cdot P}{K_t \cdot \sin \beta} - 0,075 \cdot \left(\frac{W}{\sin \beta} \right)^{0,4} \right) \quad (16)$$

где K_t – эмпирический коэффициент мутности;

P – атмосферное давление, Па;

β – угол Солнца относительно горизонта для горизонтальной принимающей поверхности, град.;

W – эквивалент глубины влагосодержания в атмосфере:

$$W = 0,4 \cdot e_a \cdot P + 2,1 \quad (17)$$

где e_a – фактическое давление пара, Па.

Показатель ясности для рассеянного излучения рассчитывается по формуле:

$$K_{Do} = 0,25 - 0,36 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } K_{Bo} \geq 0,15; \quad (18 \text{ а})$$

$$K_{Do} = 0,18 + 0,82 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } 0,065 < K_{Bo} < 0,15; \quad (18 \text{ б})$$

$$K_{Do} = 0,1 + 2,08 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } K_{Bo} \leq 0,065. \quad (18 \text{ в})$$

В случае мгновенных значений $\sin \beta$ находится из выражения [5]:

$$\sin \beta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega. \quad (19)$$

Для расчета суточного солнечного излучения $\sin \beta$ рассчитывается по формуле:

$$\sin \beta = \frac{(b \cdot g - a \cdot h) \cdot f_1 - c \cdot g \cdot f_2 + (0,5 \cdot b \cdot h - a \cdot g) \cdot f_3 + 0,25 \cdot b \cdot h \cdot f_4 + 0,5 \cdot c \cdot h \cdot f_5}{b \cdot f_1 - c \cdot f_2 - a \cdot f_3} \quad (20)$$

где g и h – константы для широты:

$$g = \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (21)$$

$$h = \cos \delta \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 – параметры для углов восхода и захода Солнца:

$$f_1 = \sin \omega_2 - \sin \omega_1 \quad (23)$$

$$f_2 = \cos \omega_2 - \cos \omega_1 \quad (24)$$

$$f_3 = \omega_2 - \omega_1 \quad (25)$$

$$f_4 = \sin 2\omega_2 - \sin 2\omega_1 \quad (26)$$

$$f_5 = \sin^2 \omega_2 - \sin^2 \omega_1 \quad (27)$$

Для анизотропного рассеянного излучения [6]:

$$f_{ia} = (1 - K_{Bog}) \cdot \left(1 + \left[\frac{K_{Bog}}{K_{Bog} + K_{Dog}} \right]^{0,5} \cdot \sin^3 \left(\frac{S}{2} \right) \right) \cdot f_i + K_{Bo} \cdot \frac{R_u}{R_{ug}} \quad (28)$$

где K_{Bog} – показатель ясности для прямого излучения на горизонтальную принимающую поверхность;

K_{Dog} – показатель ясности для рассеянного излучения на горизонтальную принимающую поверхность.

Суточное значение солнечного излучения для чистого неба состоит из прямого излучения, рассеянного излучения и отраженного излучения:

$$R_c = R_b + R_d + R_r \quad (29)$$

где R_b – суточное значение прямого солнечного излучения, Вт·ч/м²;

R_d – суточное значение рассеянного солнечного излучения, Вт·ч/м²;

R_r – суточное значение отраженного солнечного излучения, Вт·ч/м².

Прямая составляющая солнечного излучения это:

$$R_b = K_{Bo} \cdot R_u \quad (30)$$

Рассеянная составляющая солнечного излучения:

$$R_d = f_{ia} \cdot K_{Dog} \cdot R_{ug} \quad (31)$$

Отраженная составляющая солнечного излучения:

$$R_r = R_{ug} \cdot \alpha \cdot (1 - f_i) \quad (32)$$

Выводы.

Предлагаемая методика расчета солнечного излучения:

1. Позволяет рассчитать количество солнечного излучения в произвольной точке земной поверхности;

2. Учитывает достоинства и недостатки методик [2 – 5];

3. Количество солнечного излучения, рассчитанное по приведенной методике, отличается от табличных значений [1] в среднем не более чем на 16,5 %;

4. Расчетные данные, полученные по предлагаемой методике, для случая наклонного падения солнечного излучения на поверхность

солнечной батареи, расположенной на крыше здания в городе Харькове, подтверждены экспериментально.

Список литературы: 1. <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030>. 2. *Reyfeim K. J. A.* A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. *J. Appl. Meteorol.* – 1978 – № 17 – P. 1126–1131. 3. *Tian Y. Q., Davies-Colley R. J., Gong P., Thorrold B. W.* Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. Short communication. *Agric. Forest Meteorol.* – 2001 – № 109 – P. 67–74. 4. *Duffie J. A., Beckman W. A.* Solar Engineering of Thermal Process, 2nd ed. John Wiley and Sons – NY – 1991 – 15 p. 5. *Duffie J. A., Beckman W. A.* Solar Engineering of Thermal Process, 1st ed. John Wiley and Sons – NY – 1980. 6. *Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A.* Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy* – 1990 – № 45 – P. 9–17. 7. ASCE EWRI The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration Calculation, ASCE, Washington, DC – 2005 – p. 190.

Надійшла до редколегії 09.10.2013

УДК 620.9

Определение интенсивности солнечного излучения для наклонной принимающей поверхности / А. В. Борцов, Е. И. Потовская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 34–39. – Бібліогр.: 7 назв.

Представлена методика розрахунку сонячного випромінювання безхмарного неба для горизонтально розташованої і розміщеної під кутом приймаючої поверхні. Розглянуті випадки визначення миттєвих і добових значень сонячного випромінювання. Наведена оцінка отриманих результатів.

Ключові слова: сонячне випромінювання, схилення, широта, приймаюча поверхня, азимут, годинний кут Сонця, показник ясності.

The computing method of the solar radiation for cloudless sky for a horizontal and inclined receiving surfaces, have been submitted. The cases of the definition of instantaneous and daily values of solar radiation, have been considered. The assessment of the findings, have been shown.

Keywords: solar radiation, declination, latitude, receiving surface, aspect angle, hour angle, clearness index.

УДК 621.311.014

Ю.Н. ВЕПРИК, д-р техн наук, проф., НТУ "ХПИ";
О.А. ГАНУС, инж. АК «ХОЕ», асп., НТУ "ХПИ"

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

В статье рассматриваются математические модели переходных процессов в электрических системах с узлами двигательной нагрузки в фазных переменных. Данные модели требуют выполнения на каждом шаге интегрирования вычисления и обращения матриц индуктивностей электрических машин. Предложен алгоритм получения прямых и обратных матриц индуктивностей электрических машин в аналитической форме.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, математическая модель, электрические машины, двигательная нагрузка

Вступление. Узлы двигательной нагрузки являются одним из наиболее чувствительных к нарушениям электроснабжения элементов, для предотвращения отрицательных последствий таких нарушений совершенствуются средства противоаварийного управления и защиты, растет насыщенность коммутационным оборудованием. Все внешние, управляющие и защитные воздействия сопровождаются переходными процессами, поэтому возрастает доля переходных процессов и степень их влияния на режимы функционирования как узлов двигательной нагрузки, так и внешней энергосистемы. Возрастают и требования к качеству моделирования переходных аварийных режимов, так как упрощенные модели не обеспечивают требуемой точности решения, имеют ограниченный круг решаемых задач. Чтобы обеспечить точность моделирования представляется целесообразным применение уравнений в фазных переменных и неявных методов численного интегрирования.

Постановка задачи и анализ публикаций. Уравнения вращающихся электрических машин в фазных переменных из научной и учебной литературы известны, однако приводятся они, как правило, лишь для обоснования перехода к другим системам координат, после чего необходимость в определении параметров в фазных координатах отпадает. Поэтому в настоящее время параметров электрических машин в фазных переменных в справочной литературе нет и методики их определения отсутствуют, что является одним из факторов, ограничивающих применение уравнений в фазных переменных. Задачах моделирования переходных процессов в синхронных и

© Ю. Н. Веприк, О. А. Ганус, 2013

асинхронных электрических машинах (ЭМ) в настоящее время широко используются уравнения Парка-Горева. Однако почти исключительное их применение для решения этих задач было связано сначала с ограниченными возможностями вычислительной техники, а затем – со сложившейся традицией [1]. Переход к уравнениям Парка-Горева основан на линейном преобразовании, в результате которого получаются уравнения с постоянными коэффициентами. Однако постоянство коэффициентов обеспечивается лишь при условиях, когда:

- симметричны параметры ЭМ;
- отсутствуют несимметричные элементы в сети;
- сохраняется неизменной скорость вращения ЭМ.

При невыполнении хотя бы одного из этих условий переменные коэффициенты сохраняются и в преобразованных уравнениях, поэтому переход к уравнениям Парка-Горева не дает каких-либо преимуществ. Однако само преобразование Парка-Горева полезно при решении целого ряда вопросов теории электрических систем, в частности, может быть использовано для получения матриц индуктивностей (прямых и обратных) электрических машин в аналитической форме.

Основная часть. Получение прямых и обратных матриц индуктивностей в аналитической форме ниже показано на примере асинхронных двигателей (АД). Уравнения электромагнитных переходных процессов АД в дифференциальной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma} \\ \frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

где

$$L_S = \begin{bmatrix} L_{11} & & \\ & L_{11} & \\ & & L_{11} \end{bmatrix}; \quad L_R = \begin{bmatrix} L_{22} & & \\ & L_{22} & \\ & & L_{22} \end{bmatrix}; \quad [L_{SR}] = L_{12} [C_\gamma]; \quad [L_{RS}] = L_{21} [C_\gamma]^T$$

– индуктивности (собственные и взаимные) обмоток статора и ротора,

$$[C_\gamma] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

Или в более компактной форме:

$$[L_{AD}] \frac{d}{dt} [i] + \left(\omega \left[\frac{dL}{d\gamma} \right] + [R] \right) [i] = \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для перехода к конечно-разностным уравнениям, уравнения (2) нужно разрешить относительно производных:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = -[L(\gamma)]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + [L(\gamma)]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix},$$

и перейти к разностной аппроксимации в соответствии с формулой Эйлера:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)} - h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right]^{(k+1)} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)}.$$

Если перенести элементы, содержащие токи обмоток статора i_S и ротора i_R на $(k+1)$ -м шаге, в левую часть и ввести обозначение

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] = [E] + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right]^{(k+1)} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right),$$

то уравнения примут вид:

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}. \quad (3)$$

Умножив обе части уравнения (3) на обратную матрицу

$[A(\gamma)^{(k+1)}]$, получим окончательно:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)} + [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)},$$

или в более краткой форме:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)},$$

где $[Y(\gamma)^{(k+1)}] = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1}$; $\begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)} = [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}$.

Мгновенные значения скорости ω и угла ротора γ на шаге интегрирования определяются из уравнения движения привода:

$$M_{EM} + M_{MEX} = T_j \frac{d\omega}{dt},$$

где M_{EM} - электромагнитный момент, M_{MEX} - механический момент.

При наличии периодически изменяющихся индуктивностей в (1)-(2), матрицы параметров $L(\gamma)$, $Y(\gamma)$, $A(\gamma)$ необходимо вычислять и обращать на каждом шаге численного интегрирования. Для повышения эффективности вычислительных процедур, матрицы индуктивностей (прямые и обратные) обмоток АД можно представить в аналитической форме с помощью формул преобразования Парка-Горева. Матрицы статорного и роторного преобразований Парка для АД имеют вид:

$$\Pi_S = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \gamma_t & \cos\left(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \gamma_t & -\sin\left(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\Pi_R = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_t - \gamma) & \cos\left(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\gamma_t - \gamma) & -\sin\left(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Матрицы Π_S и Π_R обеспечивают приведение переменных статора и ротора к координатным осям, вращающимся с произвольной

скоростью ω_t . При этом $\gamma_t = \int_0^t \omega_t dt + \gamma_{t0}$; $\gamma = \int_0^t \omega_r dt + \gamma_0$.

Обратные матрицы Π_S^{-1} и Π_R^{-1} имеют вид:

$$\Pi_S^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_t & -\sin \gamma_t & 1 \\ \cos\left(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Pi_R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_t - \gamma) & -\sin(\gamma_t - \gamma) & 1 \\ \cos\left(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Переход от исходной матрицы индуктивностей обмоток АД в фазных координатах $[L^F] = \begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix}$, где

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_1 & M_1 & M_1 \\ M_1 & L_1 & M_1 \\ M_1 & M_1 & L_1 \end{bmatrix}, [L_{SR}] = L_{12} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix},$$

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_2 & M_2 & M_2 \\ M_2 & L_2 & M_2 \\ M_2 & M_2 & L_2 \end{bmatrix}, [L_{RS}] = L_{12} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix},$$

выполняется с помощью прямой и обратной матриц преобразования Парка:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & -\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \gamma & -\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma_e - \gamma) & -\sin(\gamma_e - \gamma) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\left(\gamma_e - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_e - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\left(\gamma_e - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma_e - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Для получения матрицы индуктивностей во вращающейся системе координат $[L]^n$ нужно исходную матрицу $[L]^F$ умножить слева на матрицу $[IT]$, а справа – на $[IT]^{-1}$:

$$[L]^n = [IT][L]^F[IT]^{-1}. \quad (4)$$

Умножение матрицы $[L]^F$ на матрицу $[IT]$ слева и на $[IT]^{-1}$ справа дает матрицу

$$[L]^n = \left[\begin{array}{cc|cc} L_{11} & & L_{12} & \\ & L_{11} & & L_{12} \\ \hline L_{21} & & L_{22} & \\ & L_{21} & & L_{22} \end{array} \right]$$

При известной матрице $[L]^n$ из (4) можно найти матрицу $[L]^F$:

$$[L]^F = [IT]^{-1}[L]^n[IT] \quad (5)$$

и ей обратную:

$$[L]^F^{-1} = [IT]^{-1}[L]^n^{-1}[IT]. \quad (6)$$

Аналогично определяются матрицы (прямая и обратная) индуктивностей для синхронных двигателей (СД). При расчетах переходных процессов как в электрических машинах, так и в электрических системах обращение матриц индуктивностей $[L]^F$ выполняется при приведении исходной системы дифференциальных уравнений (1) к форме Коши, а также на каждом шаге расчета переходных процессов методами численного интегрирования. Пользуясь формулами (5)-(6), можно исключить операцию многократного обращения матрицы $[L]^F(\gamma)$ при изменениях угла γ в ходе переходных процессов, так как эти выражения позволяют непосредственно определять все элементы обратной матрицы в функции угла γ . Использование аналитических выражений (5)-(6) для элементов обратных матриц СМ позволяет, во-первых, уменьшить объем вычислений при моделировании переходных процессов уравнениями в фазных переменных и, во-вторых, что более существенно, уменьшить погрешности вычислений, возникающих при многократном повторении операции обращения матриц индуктивностей.

Выводы. Дискретизация и алгебраизация компонентных уравнений позволяет перейти от задачи решения нелинейных интегро-дифференциальных систем уравнений к многократному решению линеаризованной системы алгебраических уравнений, что соответствует дискретизации математической модели анализируемой

системы в отдельных точках рассматриваемой временной области. Полученные с использованием преобразования Парка-Горева аналитические выражения для элементов обратных матриц индуктивностей синхронных и асинхронных двигателей позволяют исключить операции многократного их обращения в ходе численного интегрирования и уменьшить погрешности вычислений.

Список литературы: 1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. / С.А. Ульянов - М.: Энергия, 1970. 2. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой. / С.И. Гамазин, Г.А. Садыкбеков. – Алма-Ата: Гылым, 1991, С. 301. 3. Веприк Ю.Н. Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах. / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедева, В.Ю. Веприк - Электротехника и электромеханика. - 2005. № 3. С. 74-77. 4. Косыкин Ю.П. Расчет переходных процессов в автономных электроэнергетических системах. / Ю.П. Косыкин, Н.Н. Смирнова – Электричество - 1987, № 4. 5. Рудевич Н.В. Математическая модель синхронного генератора в фазных координатах для исследования электромагнитных переходных процессов в среде MATLAB. / Н.В. Рудевич, М.Ф. Пискуров. – Вісник НТУ «ХП» - 2013. - № 17. С. 115-119.

Надійшла до редколегії 03.10.2013

УДК 621.311.014

Параметры электрических машин в математических моделях узлов двигательной нагрузки / Веприк Ю.Н., Ганус О.А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Энергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 40–46. – Бібліогр.: 5 назв.

У статті розглядаються математичні моделі перехідних процесів в електричних системах з вузлами двигунного навантаження в фазних змінних. Дані моделі вимагають виконання на кожному кроці інтегрування обчислення та звернення матриць індуктивностей електричних машин. Запропоновано алгоритм отримання прямих і зворотних матриць індуктивностей електричних машин в аналітичній формі.

Ключові слова: енергосистема, перехідні процеси, математична модель, електричні машини, двигунне навантаження

Mathematical models of transients in electrical systems with nodes of motor load in the phase variables are discussed. These models require the performance computation and inversion of inductance matrix of electrical machines at each step of the integration. The algorithm for obtaining the direct and inverse inductance matrices of electrical machines in the analytical form is proposed.

Keywords: power system, transients, mathematical model, electrical machines, motor load

О. В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц. НТУ«ХПИ»

И. УДОВЕНКО, студент НТУ«ХПИ»;

М. НАЙДЕНКО, студент НТУ «ХПИ»

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНО - ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

В статье рассмотрены экономические аспекты надежности технических объектов, к которым также относится кабельно-проводниковая продукция. Проанализирована связь экономической эффективности производства с надежностью технологической системы этого производства, причем именно с ее оптимальной надежностью. Также в работе рассмотрены проблемы рисков изготовителя и заказчика при принятии технологических решений в процессе производства.

Ключевые слова: надежность, технический объект, изготовитель, заказчик, риск.

Введение. Проблема обеспечения надежности технических объектов включает научные, технические, социальные и экономические аспекты. Поэтому в обеспечение надежности входит не только выполнение чисто технических задач, но и обеспечение социальных и экономических требований к любому техническому решению.

Для обобщения всех характеристик надежности электроснабжения нужно использовать единый критерий эффективности. В современных рыночных условиях таким показателем являются экономические затраты.

Для потребителя энергии важно оценить ущерб, который он будет иметь из-за ненадежности электроснабжения в случае нарушения технологического процесса и срыва поставок своей продукции. Для электроснабжающей организации обеспечение заданной надежности выражается в повышении капитальных затрат и ежегодных издержек на содержание резервного электрооборудования. При этом экономический ущерб является лишь частью хозяйственного ущерба, который может иметь еще социальные и экологические составляющие, не оцениваемые в денежном выражении [1].

Анализ последних достижений и литературы. Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы. Особенно актуальна она для сложных систем, таких как системы электроснабжения, состоящих из большого числа элементов и имеющих обширные внутренние и внешние связи [2]. В современных рыночных условиях надежность

электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий [2].

Известные модели анализа надежности, оставаясь работоспособными, в некоторых случаях могут быть модернизированы с учетом новых условий. В первую очередь это касается учета в них взаимоотношений между субъектами рынка. При этом требуется уметь определять и учитывать справедливое распределение затрат и прибыли между участниками рынка. Ранее разработанные модели синтеза надежности должны быть усовершенствованы с учетом изменения условий и критериев задач управления надежностью, методологических подходов, нормативно-правовых баз, которые будут реализованы на практике. В основу таких моделей должны быть положены новые математические методы и информационные технологии [3].

Материалы исследований. Силовые кабели являются элементами системы электроснабжения. Надежность кабелей характеризуется рядом показателей: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, режимной управляемостью, устойчивостью, живучестью и безопасностью. В государственных стандартах на силовые кабели напряжением до 10 кВ требования к показателям надежности сформулированы относительно срока службы и частично срока сохраняемости. Следствием использования таких стандартов стало использование «ускоренных» методов испытаний [4], что в свою очередь позволило снизить затраты на испытания кабельно-проводниковой продукции. Данные, полученные в результате таких испытаний, не несут достаточной информации о том, как поведет себя система в режимах реальной эксплуатации. Например, интенсивность внешних воздействий на изоляцию кабеля в процессе эксплуатации может изменяться случайным образом, а лабораторные испытания проводятся в стандартных условиях, где данные изменения не учитываются. Таким образом, вероятностные оценки показателей надежности кабельно-проводниковой продукции требуют постоянно действующей системы наблюдений за отказами в период эксплуатации [3].

Другая проблема заключается в том, что практически все испытания кабелей и проводов являются разрушающими и выборочными, т.е. испытывается только малая часть массовой продукции и существует конечная вероятность, что продукция, поступившая к потребителю не будет соответствовать технической документации. Следовательно, требования заказчика получить гарантию надежности товара может обеспечить применение

сплошного контроля готовой продукции, который, в свою очередь, могли бы обеспечить автоматизированные системы управления технологическими процессами. Однако исключить выборочный контроль из графика испытаний кабелей и проводов невозможно [5], поэтому полностью отказаться от вероятностных оценок показателей надежности также нельзя.

Главной и наиболее сложной задачей, связанной с обеспечением надежности технических объектов, является задача принятия экономически оправданных решений как для производителя, так и для заказчика массовой продукции [6]

В электроэнергетике (у потребителя кабелей, изоляторов, конденсаторов, электрических машин и аппаратов) пользуются [7] показателем надежности системы, которая равняется отношению фактически выработанной электроэнергии к наибольшей, которая была бы выработана при данных условиях при абсолютно надежной работе системы. Называют этот показатель коэффициентом использования мощности (КИМ). Принципиальный характер зависимости удельных приведенных затрат E от величины КИМ (см. рис. 1)

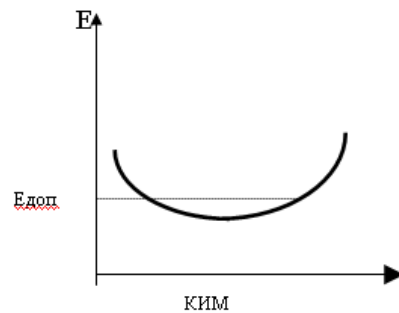


Рис.1 — Принципиальный характер зависимости удельных приведенных затрат E от коэффициента использования мощности КИМ

Удельные приведенные затраты $E=Z/B=(\epsilon K+U+Y)/B$, где Z – приведенные затраты (на год); ϵ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений K ; U – ежегодные эксплуатационные затраты для безотказной системы; Y – ежегодные затраты на ненадежность, например, ремонтные расходы; B – объем годового выпуска продукции.

Рисунок показывает тот факт, что, во-первых, существует диапазон значений КИМ (показателя надежности), при которых затраты на производство электроэнергии минимальны и, во-вторых, чем меньше допустимый для производителя уровень затрат $E_{доп}$, тем

выше требования к точности решений относительно элементов системы. Таким образом, экономическая эффективность производства напрямую связана с надежностью технологической системы этого производства. Вообще, если говорить о нормативных документах, экономические показатели надежности либо вообще не упоминаются, либо приводятся в виде вспомогательных параметров, которым никакой существенной роли в анализе надежности технологических систем не отводится [1].

Однако экономические показатели надежности часто являются достаточно информативными и тесно взаимосвязанными с чисто техническими показателями. Система экономических показателей надежности технологической системы позволит оценить взаимосвязь технических, технологических и экономических факторов, определяющих надежность, а также предоставить более четкую информацию потребителям конечного продукта.

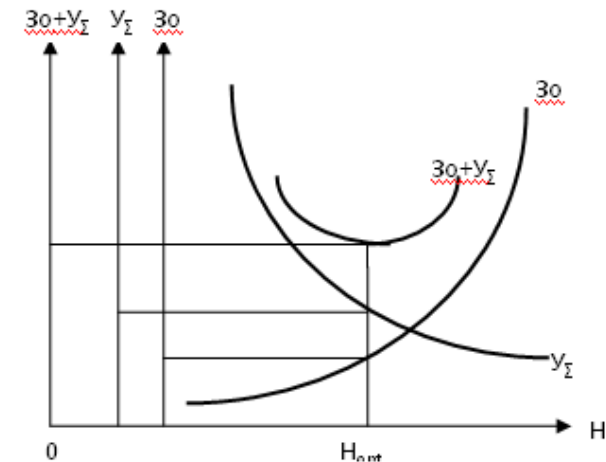


Рис.2 — Графическое изображение оптимальной надежности технической системы [1]: H – условный показатель надежности технической системы; Y_{Σ} – суммарный ущерб от отказов технической системы за год; Z_0 – приведенные затраты на повышение надежности; $Y_{\Sigma opt}$, H_{opt} , $Z_0 opt$ – соответствующие оптимальные значения ущерба, надежности и затрат

При этом к экономическим показателям надежности технических систем предъявляется ряд требований: учет внешних факторов, прежде всего интересов потребителей (например, потребителей электрической энергии или кабельно-проводниковой продукции); учет затрат, связанных с ненадежностью системы (например на резервирование); использование экономических показателей надежности как

комплексних (учитывающих как процесс производства продукции, так и эксплуатацию), так и дифференцированных (для разных этапов производства и эксплуатации).

Функции, представленные на рис.2 носят иллюстративный характер и дают лишь общее представление о связи затрат с надежностью любой технической системы [1].

Например, стоимость кабельных линий выше, чем стоимость соответствующих воздушных линий электропередач, однако эта разница является существенной только для высоковольтных линий. Для кабельных линий среднего напряжения их стоимость всего на 14 - 16 % выше стоимости ЛЭП, однако воздушные линии электропередач дороже в эксплуатации [3]. Поэтому общая стоимость кабельных линий среднего напряжения в течение всего срока службы меньше, чем соответствующая стоимость ЛЭП. Следовательно, более высокая надежность кабельных линий и сравнительно низкая стоимость эксплуатационных затрат являются определяющим фактором возможной замены ЛЭП на кабельные линии.

Выводы. Задача оценки экономической целесообразности любого шага по повышению надежности кабельно-проводниковой продукции должна быть решена с учетом интересов как производителя так и заказчика. Для этого необходимо использовать как у производителей, так и заказчиков единых, четко определенных и согласованных, количественных показателей надежности технических объектов. При этом экономические показатели являются неотъемлемой частью системы надежности технических систем и должны использоваться наряду с показателями безотказности, ремонтнопригодности, сохраняемости, долговечности и др.

Список литературы: 1. Эдельман В.И. Надежность технических систем. Экономическая оценка / В.И. Эдельман – М.: Экономика, 1988. – 151 с. 2. Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения: Уч. пособие для студентов специальности «Электроснабжение»/ А.Н. Шеметов – Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. 3. Карпушенко В.П. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість./В.П. Карпушенко, Л.А. Щепенюк, О.А. Науменко, Антоненко Ю.О.; Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 4. Быков Е.В. Эволюция взглядов на надежность кабельной продукции/ В.Е. Быков // Кабели и провода. – 2011. - № 3[328]. – С.24-27. 5. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе производства: дисс. канд. техн. наук: 05.11.13/ Голик Оксана Вячеславовна. – Х., 2009. – 180 с. 6. Щепенюк Л.А. Математичні основи надійності ізоляції електрообладнання: Навч. – метод. посібник / Л.А. Щепенюк, О.В. Голик – Харків: НТУ «ХПІ», 2003 – 102 с. 7. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности/Б.В.Гнеденко, Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

Надійшла до редколегії 02.11.2013

УДК 519.2

Экономические аспекты надежности кабельно-проводниковой продукции./ Голик О.В., Найденко М., Удовенко И// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. - № 59 (1032). С.47 - 52 . – Бібліогр.: 7 назв.

У статті розглянуті економічні аспекти надійності кабельно-проводникової продукції. Проаналізовано зв'язок економічної ефективності технічної системи з її оптимальною надійністю.

Ключові слова: надійність, технічний об'єкт, економічні показники надійності, ризик.

The article presents the economic aspects of the reliability of the technical facilities that include a cable and wire products. The relation between the economic efficiency of production technology with the reliability of the system of production, and it is with its optimum reliability.

Keywords: reliability, technical unit, the manufacturer, the customer, risk.

А. Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Ю. Г. ГОНТАРЬ, асп. НТУ «ХПИ»

РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДИЭЛЕКТРИКА В КОНЦЕВЫХ КАБЕЛЬНЫХ МУФТАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрены вопросы разрушения поверхностного слоя полимерного диэлектрика кабеля в концевых муфтах под действием полного и срезанного импульсов грозового перенапряжения. Показано влияние ОПН на расширение спектра высокочастотных составляющих в импульсах перенапряжения, что может привести к проявлению «эффекта Воробьевых», когда вольт-секундные характеристики поверхностного и объемного пробоя сравнимы и вероятность перекрытия изоляции сравнима с вероятностью пробоя. Этот процесс ускоряет развитие водных трингов и растрескивание поверхностного слоя изоляции.

Ключевые слова: полимерная изоляция, концевая муфта, грозовые перенапряжения.

При эксплуатации кабельных линий нередко возникают электрические пробой кабельных муфт. Одной из вероятных причин пробоя является воздействие грозовых перенапряжений на наиболее уязвимые места линий – концевые муфты в местах среза металлических оболочек кабелей. Кроме того, при монтаже муфты производится разводка трех жил кабеля, что приводит к смятию изоляции, снижению толщины изоляции жил по отношению к толщине изоляции между жилой и экраном. Это приводит к усилению электрического поля между жилой кабеля и выступающими кромками оболочки. В этих местах напряженность поля превышает допустимый уровень ударной ионизации изоляционного материала, что ведет к разрушению как поясной, так и фазной изоляции.

В [1, 2] описаны способы снижения напряженности поля на этих участках разделки кабеля.

В известных способах соединения электрических кабелей с рабочим напряжением от 1 кВ применяются различные методы понижения напряженности электрического поля в указанной области.

Широко применяется метод защиты от пробоя поясной изоляции и изоляции жил, при котором срезу оболочки каждого кабеля придать форму раструба, делая надрез оболочки в месте предполагаемого среза и обрывая ее по надрезу, при этом кромка оболочки отодвигается от жил кабеля. Однако данный метод не дает надежного результата, возникают новые неровности и заусеницы. Такой способ трудоемок,

© А. Г. Гуриц, Ю. Г. Гонтарь, 2013

требует применения специфического инструмента. Кроме того, при такой обработке существует большая вероятность повреждения поясной изоляции и изоляции жил инструментом.

Известен способ защиты от пробоя посредством муфты марки Scotchcast. При данном способе соединения кабеля зачищаются от поясной изоляции, полупроводящей бумаги, оболочки, брони и джутового покрова, на зачищенный участок поясной изоляции кабелей наматывается лента Scotch 23 с высокой диэлектрической прочностью и высоким удельным сопротивлением, поверх нее с заходом на оболочку намотана герметизирующая мастика Elastoseal, поверх мастики наматывается лента Scotch 23 с толщиной подмотки 4 мм.

На рис. 1, *а* показан механизм образования повышенной напряженности поля в собранной муфте, продольный разрез. Для упрощения штриховка изоляции не показана. Жила 1 в процессе разделки кабеля и монтажа муфты изогнута, изоляция 2 жилы продавлена оболочкой 3 и полупроводящей бумагой 4, скопление заряда на кромке оболочки образует повышенную напряженность поля, что показано распределением силовых линий 5. Проводящая поверхность 6 является корпусом муфты либо ее экранирующим элементом.

На рис. 1, *б* показано распределение силовых линий поля в корешке кабеля в смонтированной муфте Scotchcast, ее продольный разрез. Жилы кабеля 1 поверх фазной изоляции 2 стянуты плотной намоткой изолирующей ленты 3, поверх которой намотаны мастика Elastoseal 4 и второй слой изолирующей ленты 5. Полупроводящая бумага 6 оборвана по краю оболочки 7. Проводящая поверхность 8 является экраном муфты. Для упрощения чертежа штриховка изоляции и лент не показана. Между полупроводящей бумагой и жилой поле однородно, на срезе оболочки полупроводящей бумаги наблюдается увеличение плотности силовых линий.

Основным недостатком такого способа является отсутствие механизмов выравнивания эквипотенциальных полей, т.е. снижения напряженности поля. Кроме того, мастика Elastoseal имеет большую текучесть, что затрудняет ее намотку, а выдержать толщину намотки второго слоя ленты Scotch 23 в 4 мм не представляется возможным.

Известен способ защиты от пробоя муфты посредством регулирования распределения силовых линий поля, использованный в муфте марки Raychem типа GUSJ12 производства Tyco Electronics, при котором кабели зачищаются от джута, брони, оболочки и полупроводящей бумаги, причем полупроводящая бумага обрывается по ниточному бандажу на расстоянии 5 мм от среза оболочки, корешок кабеля обматывается лентой с высокой диэлектрической проницаемостью.

Корешок кабеля в смонтированной муфте показан на рис. 1, в, где 1 – жила, 2 – фазная изоляция, 3 – полупроводящая бумага, 4 – оболочка, 5 – экран, 6 – лента. Для упрощения штриховка диэлектриков не показана. Как видно из чертежа, поле 7 имеет высокую неоднородность.

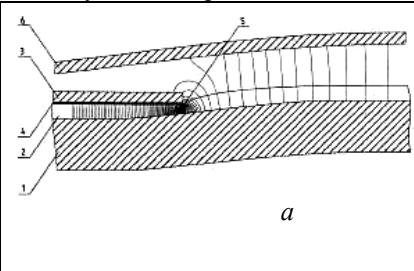
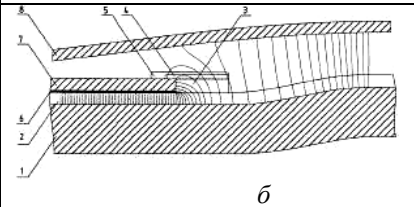
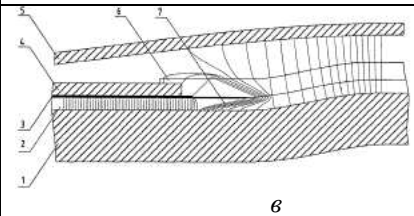
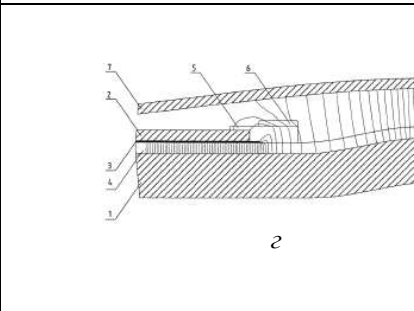
 <p style="text-align: center;">а</p>	<p>1 – жила; 2 – фазная изоляция; 3 – оболочка; 4 – полупроводящая бумага; 5 – распределение силовых линий; 6 – проводящая поверхность (корпус муфты либо ее экранирующий элемент).</p>
 <p style="text-align: center;">б</p>	<p>1 – жила кабеля; 2 – фазная изоляция; 3, 5 – изолирующая лента; 4 – мастика Elastoseal; 6 – полупроводящая бумага; 7 – оболочка; 8 – проводящая поверхность (экран муфты).</p>
 <p style="text-align: center;">в</p>	<p>1 – жила; 2 – фазная изоляция; 3 – полупроводящая бумага; 4 – оболочка; 5 – экран; 6 – лента; 7 – силовые линии поля.</p>
 <p style="text-align: center;">г</p>	<p>1 – жила кабеля; 2 – оболочка; 3 – полупроводящая бумага; 4 – фазная изоляция; 5 – лента с высоким сопротивлением и высокой диэлектрической прочностью с заходом на оболочку на 10 мм; 6 – виток ленты с высокой электрической прочностью; 7 – проводящая поверхность (корпус муфты либо ее экранирующий элемент).</p>

Рис. 1 – Распределение силовых линий поля в зоне разделки кабеля концевой муфты

Недостатком данного способа является большой расход дорогостоящей ленты при высокой результирующей неоднородности поля. Кроме того, показанное на рисунке расположение ленты является

схематическим, не достижимым на практике, практически же намотать ленту с таким прилеганием к полупроводящей бумаге невозможно, в результате форма силовых линий между жилой и кромкой полупроводящей бумаги аналогична показанной на рис. 1, б и, таким образом, применение ленты не дает положительного результата.

На рис. 1, г показан корешок силового кабеля, соединенного посредством муфты, дан продольный разрез. Жилы кабеля 1 зачищены от оболочки 2 и полупроводящей бумаги 3, полупроводящая бумага выступает за край оболочки на 3 мм, жилы поверх фазной изоляции 4 обмотаны лентой 5 с высоким сопротивлением и высокой диэлектрической прочностью с заходом на оболочку на 10 мм, на край подмотки наложен виток ленты 6 с высокой диэлектрической прочностью.

Проводящая поверхность 7 является корпусом муфты либо ее экранирующим элементом. Изгиб жилы начинается дальше среза оболочки, т.к. жилы зафиксированы между собой плотной намоткой изолирующей ленты. Наибольшая напряженность поля создается в непосредственной близости от края полупроводящей бумаги, однако наличие диэлектрика с диэлектрической постоянной, превышающей проницаемость материала изоляции жил и заливаемого в муфту компаунда снижает ее ниже уровня, при котором происходит пробой диэлектрических компонентов муфты. Силовые линии электрического поля распределены следующим образом: между полупроводящей бумагой и жилой поле однородно, вокруг намотки ленты с высокой диэлектрической постоянной силовые линии поля искривлены таким образом, что в месте обрыва бумаги создано снижение напряженности. Данный эффект обусловлен преломлением силовых линий на границе раздела диэлектриков.

Особенности конструкции, монтажа и эксплуатации кабельных муфт для кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ рассмотрены в [3].

Рассмотрение различных вариантов разделки кабеля в концевой муфте не позволяет полностью решить задачу выравнивания напряженности электрического поля. Слой изоляции между краем разделки экрана и жилой кабеля остается одним из напряженных мест с точки зрения вероятности развития водных дендритов и пробоя кабеля. Воздействие на этот узел кабельной линии грозовых перенапряжений и особенно их высокочастотных составляющих ускоряет этот процесс.

Форма и спектральный состав воздействующих грозовых перенапряжений на внутреннюю изоляцию кабельной разделки концевой муфты

На рис. 2 приведена форма стандартного импульса грозового перенапряжения.

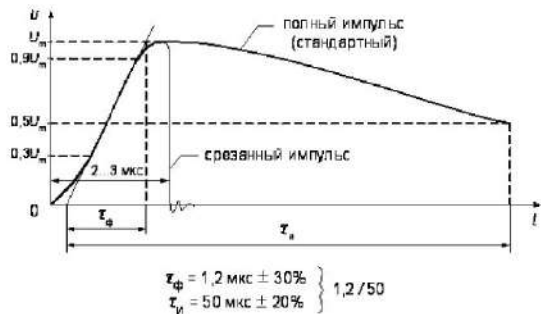


Рис. 2 – Форма полного и срезанного импульса грозового перенапряжения

Определение частотного спектра полного импульса грозового перенапряжения приведена в [4], где комплексная функция частоты (амплитуда импульса) $F(\omega)$ представлена в виде

$$F(\omega) = a(\omega) + jb(\omega) \quad (1)$$

Выражения $a(\omega)$ и $b(\omega)$ определяется формулами:

$$a(\omega) = \frac{U_{\tau_1}}{1 + (\omega\tau_1)^2} \left[1 + e^{-T_c/\tau_1} (\omega\tau_1 \sin \omega T_c - \cos \omega T_c) \right] - \frac{U_{\tau_2}}{1 + (\omega\tau_2)^2} \left[1 + e^{-T_c/\tau_2} (\omega\tau_2 \sin \omega T_c - \cos \omega T_c) \right] \quad (2)$$

$$b(\omega) = \frac{U_{\tau_1}}{1 + (\omega\tau_1)^2} \left[\omega\tau_1 + e^{-T_c/\tau_1} (\omega\tau_1 \cos \omega T_c + \sin \omega T_c) \right] - \frac{U_{\tau_2}}{1 + (\omega\tau_2)^2} \left[\omega\tau_2 + e^{-T_c/\tau_2} (\omega\tau_2 \cos \omega T_c + \sin \omega T_c) \right] \quad (3)$$

где T_c – момент среза импульса, мкс;

τ_1, τ_2 – длительность и время фронта импульса.

Для полного импульса можно положить $T_c = \infty$ и тогда

$$R(j\omega) = U \left\{ \frac{\tau_1}{1 + (\omega\tau_1)^2} - \frac{\tau_2}{1 + (\omega\tau_2)^2} - j \left[\frac{\omega\tau_1^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} - \frac{\omega\tau_2^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \right] \right\} \quad (4)$$

Для нормального грозового импульса 1,5/50 мкс имеем $\tau_1 = 69$ мкс и $\tau_2 = 0,4$ мкс. На рис. 3 приведены спектры нормальных грозовых импульсов, срезанных при $T_c = 40; 0,5; 0,1$ мкс. Из этого рисунка ясно, что с уменьшением фронта импульса появляются составляющие более высокой частоты.

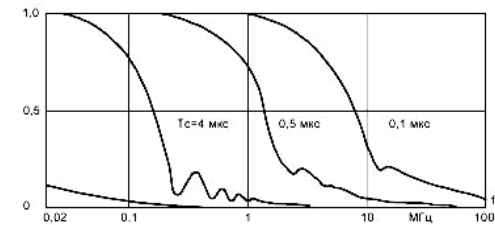


Рис. 3 – Спектры нормальных грозовых импульсов при различном времени до среза T_c

При установке ограничителей перенапряжений на кабельной линии (рис. 4), которая соединяет воздушную линию с подстанцией, кабельная линия подвержена грозовым перенапряжениям со стороны воздушной линии. ОПН в начале кабельной линии ограничивает перенапряжение до 4 раз при времени срабатывания до 25 пс.

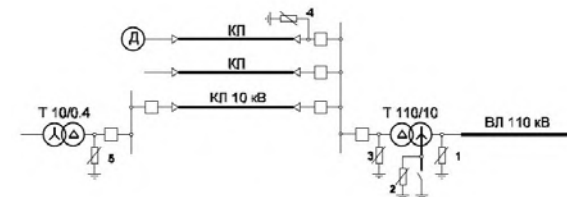
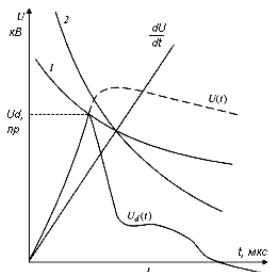


Рис. 4 – Схема электроснабжения предприятия с ОПН

В этом случае, в результате отражений импульса напряжения в кабеле, перенапряжения на другом конце кабеля выше, но не достигают уровня опасного для кабеля, а представляют опасность для стационарного оборудования (в первую очередь, трансформаторов и концевых муфт). Резкий срез перенапряжения с помощью ОПН вызывает расширение спектра частот импульса до 4–6 МГц и усиливает вероятность не только перекрытия, но и пробоя концевых муфт.

Наличие крутого фронта грозового импульса (меньше 1,2 мкс) приводит к такому состоянию контакта «экран–жила», когда вольт–секундные характеристики развития скользящего разряда по поверхности изоляции жилы и пробоя изоляции кабеля сравнимы и возможна равная вероятность этих процессов и самого разряда. Возникает т.н. «эффект Воробьевых», когда электрическая прочность изоляции, смоченной влагой или пропитывающим гелем, становится выше, чем прочность основного слоя диэлектрика. Этот эффект был открыт группой ученых ТПИ А. А. Воробьевым и Г. А. Воробьевым и назван «эффектом Воробьевых» [5].



$U(t)$ – импульс воздействующего напряжения;
 U_{dis} – напряжение, при котором наступает пробой твердого диэлектрика;
 $U_d(t)$ – напряжение на диэлектрике в процессе разряда в нем;
 1 и 2 – вольт-секундные характеристики соответственно твердого (ТД) и жидкого (ЖД) диэлектриков;
 A_c – критическая крутизна напряжения на фронте импульса напряжения, выше которой проявляется «эффект Воробьевых»

Рис. 5 – Проявление «эффекта Воробьевых» при воздействии импульса перенапряжения на слой жидкого и твердого диэлектрика.

Принцип действия этого эффекта показан на рис. 5, где точка пересечения вольт-секундных характеристик определяет критическую крутизну импульса напряжения, при котором наблюдается этот эффект.

В [5] внедрение поверхностного разряда вглубь изоляции жилы объясняется тем, что при большой концентрации энергии на микровыступах поверхности металлического экрана муфты происходит взрыв этого объема, который сопровождается выбросом порции плазмы. Проникая вглубь твердого диэлектрика, она вызывает его испарение и появление микротрещин, которые в процессе эксплуатации муфты прорастают вглубь, вызывая его пробой [6].



Рис. 6 – Модель электродов концевой муфты кабеля

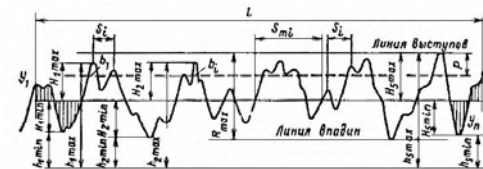


Рис. 7 – Профиль поверхности проводящего конуса при обработке поверхности по 5 классу шероховатости

На рис. 6 показана зона изоляционной поверхности муфты, в которой возникают процессы электроимпульсного разрушения диэлектрика. Т. к. применяемые методы механической обработки поверхности проводящего конуса не превышают 5 класса шероховатости, то можно принять, что для этого класса среднее арифметическое значение отклонений профиля микровыступов в пределах базовой длины составляет 3–5 мкм, а высота неровностей профиля по 10 точкам от 10 до 20 мкм. Напряженность поля на вершинах микровыступов высотой $1 \div 10$ мкм, что соответствует 5 классу чистоты поверхности, создает напряженность поля на вершинах микроострий более чем в 100 раз выше, что является достаточным для появления автоэлектронной эмиссии с катода и образования пламенного разряда.

Выводы: 1. Грозовые перенапряжения ускоряют процесс разрушения изоляционной поверхности кабеля за счет высокочастотных составляющих, способных создавать условия проявления «эффекта Воробьевых», что может служить причиной создания условий для развития водных трингов.

2. Установка ОПН на кабельных вставках подстанций повышает скорость среза импульса перенапряжения, повышая спектр высокочастотных составляющих.

3. С целью снижения условий возникновения пламенного разряда на шероховатой поверхности конуса и выравнивающих элементов муфты необходимо применять как конструктивные, так и технологические мероприятия, способствующие снижению напряженности поля в этой зоне.

Список литературы: 1. Шувалов М. Ю. Развитие водных трингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера / М. Ю. Шувалов, Ю. В. Образцов, В. Л. Овсиенко, П. Ю. Удовицкий, А. С. Мнека // Кабели и провода. – 2006. – №4(299). – С. 14-19. 2. Шидловский А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2013. – 550 с. 3. Шидловский А. К. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из

штитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ / А. К. Шидловский, В. М. Золотарев. – Х.: Майдан. – 2007. – 62 с. 4. Рябов Б. М. Измерение высоких импульсных напряжений / Б. М. Рябов. – Л.: Энергоатомиздат. – 1983. – 124 с. 5. Месяц Г. А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков / Месяц Г. А. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып. 24. – С. 51–59. 6. Гонтарь Ю. Г. Влияние напряженности электрического поля на разрушение поверхностного слоя изоляционной конструкции / Ю. Г. Гонтарь, Д. В. Лавинский // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №4. – С. 40-43.

Надійшла до редколегії 11.11.2013

УДК 621.315.687.24

Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозовых перенапряжений / А. Г. Гурии, Ю. Г. Гонтарь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 53 - 61. – Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуті питання руйнування поверхневого шару полімерного діелектрика кабелю в кінцевих муфтах під дією повного та зрізаного імпульсів грозової перенапруги. Показано вплив ОПН на розширення спектру високочастотних складових в імпульсах перенапруги, що може призвести до прояву «ефекту Воробьейвих», коли вольт-секундні характеристики поверхневого та об'ємного пробоя порівняні та вірогідність перекриття ізоляції порівняна з вірогідністю пробоя. Цей процес пришвидшує розвиток водних тріаннів та розтріскування поверхневого шару ізоляції.

Ключові слова: полімерна ізоляція, кінцева муфта, грозові перенапруги.

Questions of destruction of a blanket of polymeric dielectric of a cable in trailer couplings under the influence of the full and cut-off impulses of a storm overstrain are considered. Impact of limiters of an overstrain on expansion of a range of high-frequency components in overstrain impulses that can lead to manifestation of “Vorobyev’s effect” when volt-second characteristics of superficial and volume breakdown are comparable is had and probability of overlapping of isolation is comparable with probability of breakdown. This process accelerates development water treeing and cracking of blanket of isolation.

Key words: polymeric isolation, trailer coupling, a storm overstrain.

УДК 621. 315

О.Г. КЕССАЄВ, аспірант НТУ «ХПІ»

ВПЛИВ НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ ТА ЕЛІПТИЧНОСТІ КОАКСІАЛЬНИХ РАДІОЧАСТОТНИХ КАБЕЛІВ

На основі числових розрахунків виконано аналіз впливу на хвильовий опір ексцентриситету та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів. Показано, що урахування зміни всіх первинних параметрів в неоднорідній конструкції кабелю призводить до підвищення точності в визначенні хвильового опору.

Ключові слова: коаксіальні радіочастотні кабелі, ексцентриситет, еліптичність, хвильовий опір.

Вступ. Час «цифрових технологій» викликає необхідність появи додаткових вимог до швидкості, обсягу і якості переданих інформаційних потоків, що передбачає постійне нарощування можливостей в області передачі даних. Волоконно-оптичні кабелі мають виняткові характеристики по перешкодозахищеності та несанкціонованому доступу до інформації. Ніякі зовнішні електромагнітні перешкоди в принципі не здатні спотворити світловий сигнал, а сам сигнал не породжує зовнішніх електромагнітних випромінювань. Підключитися до цього типу кабелю для несанкціонованого прослуховування мережі практично неможливо, тому що при цьому порушується цілісність кабелю. Теоретично можлива смуга пропускання такого кабелю досягає величини 1 ТГц, що в 1000 разів вище, ніж в електричних кабелів. Вартість оптоволоконного кабелю постійно знижується і зараз приблизно дорівнює вартості тонкого коаксіального кабелю.

Найбільш поширені оптичні кабелі модульної конструкції сердечника (сердечник із центральним силовим елементом, переважно зі склопластикового стержня, навколо якого перебувають трубки-модулі з розташованими в них оптичними волокнами) ємністю до 288 оптичних волокон і трубчатої конструкції ємністю до 896 оптичних волокон (так звані Ribbon конструкції).

Впровадження волоконно-оптичних кабелів не знімає питання щодо застосування традиційних електричних кабелів на основі витих пар та коаксіальних радіочастотних. Ці кабелі використовуються в якості абонентських для підключення відповідного приймача цифрових сигналів: комп'ютера, телевізора, тощо. В зв'язку з розширенням спектру робочих частот, що передаються по таким

© О. Г. Кессаєв, 2013

кабелям, до них висуваються більш жорсткі вимоги, як до конструкції, так і до параметрів передачі в цілому [1].

Ціль статті - обґрунтування значень ексцентриситету та еліптичності в конструкції коаксіальних радіочастотних кабелів на основі розрахунків первинних параметрів.

Хвильовий опір – індивідуальна характеристика кабелю.

Для оцінки експлуатаційних і технічних якостей кабелів використовуються хвильовий опір $Z_{\text{в}}$ та коефіцієнт загасання.

Хвильовий опір – комплексне число, яке визначається первинними параметрами, є функцією частоти і не залежить від довжини кабелю [2]:

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{R_{\text{кк}} + j\omega L_{\text{кк}}}{G_{\text{из}} + j\omega C_{\text{кк}}}}, \text{ Ом.} \quad (2)$$

де $R_{\text{кк}}$ – опір провідників (Ом/м), $L_{\text{кк}}$ – загальна індуктивність, яка складається із внутрішніх індуктивностей провідників та міжпровідникової (Гн/м); $C_{\text{кк}}$ – ємність (Ф/м) та $G_{\text{кк}}$ – активна провідність ізоляції (См/м) на відповідній круговій частоті $\omega=2\pi f$.

Коефіцієнт загасання – також частотно-залежний параметр, але суттєво залежить від довжини і конструкції кабелю (діаметру провідників, матеріалу та товщини ізоляції).

В області високих частот хвильовий опір має активний характер (див. формулу (2)) і асимптотично наближається до фіксованого (нормованого) значення, причому для різних типів кабелів – це індивідуальне значення.

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{L_{\text{кк}}}{C_{\text{кк}}}}, \text{ Ом.} \quad (2)$$

Так, у кабелів з витими парами незалежно від категорії, тобто верхньої робочої частоти та конструкції, типові значення хвильового опору становить 100 Ом в діапазоні частот вище 1 МГц, у радіочастотних коаксіальних для підключення телевізійних приймачів – 75 Ом. **Таким чином, хвильовий опір є більш загальним параметром.**

Вплив ексцентриситету на первинні параметри передачі. При наявності ексцентриситету, еліптичності в конструкції кабелю картина електромагнітного поля спотворюється [3], що призводить до зміни всіх первинних параметрів. Тому необхідно враховувати зміну активного опору та індуктивності, ємності та активної провідності ізоляції за рахунок перерозподілу електромагнітної енергії в поперечному перетині кабелю. Ці зміни, безумовно, призведуть до зміни значень хвильового опору. Для врахування цих змін розрахунок хвильового опору необхідно виконувати за загальною формулою (1).

При виготовленні кабелів та їх монтажу можливо відхилення хвильового опору від фіксованого значення, перш за все, за рахунок ексцентриситету Δ в розташуванні прямого та зворотного провідників коаксіального радіочастотного кабелю (рис.1б).

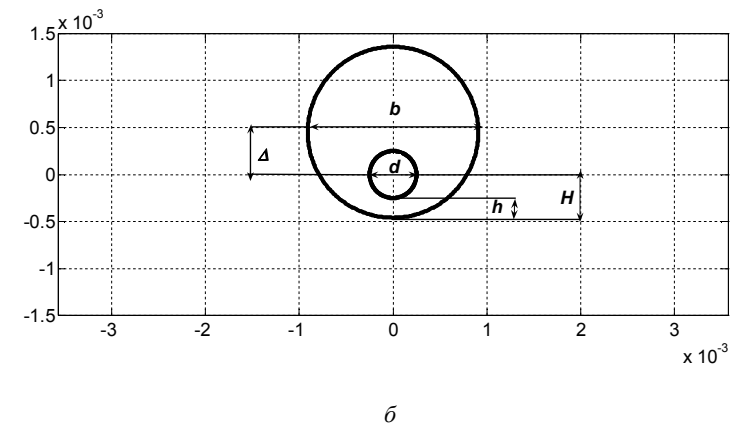
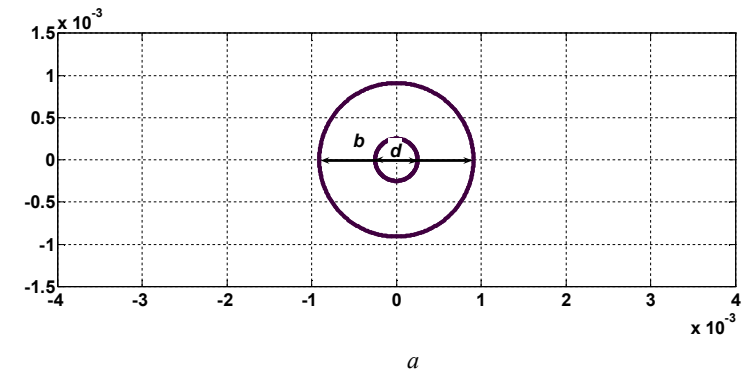


Рис.1 – Конструкція коаксіального кабелю: а – ідеальна конструкція коаксіального кабелю, без ексцентриситету; б – реальна конструкція коаксіального кабелю - з ексцентриситетом Δ

Розрахунок первинних параметрів виконано чисельними методами: активного опору та індуктивності – на підставі рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для магнітозв'язаних контурів методом Кірхгофа; електричної ємності та активної провідності ізоляції - методом вторинних зарядів [4 - 5]. На рис.2 – рис.5 наведено

результати розрахунків первинних параметрів коаксіального кабелю для частоти 100 МГц при наявності в конструкції ексцентриситету (позначено індексами «е»), а на рис. 6 – вплив ексцентриситету на хвильовий опір [6].

При одному і тому ж відносному значенні ексцентриситету зміна параметрів – різна. Так, при $\Delta/d = 0,5$ ємність і активна провідність ізоляції збільшуються на 2,5%, загальна індуктивність – зменшується на 7,5%, а активний опір – збільшується більш ніж на 20% відносно значень для конструкції без ексцентриситету (позначено індексами «о»).

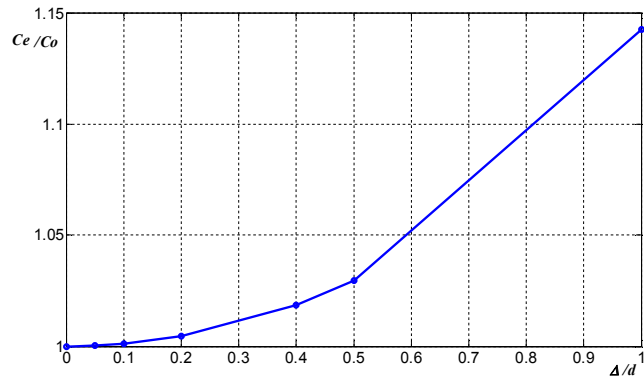


Рис.2 – Вплив ексцентриситету на робочу ємність коаксіального радіочастотного кабелю

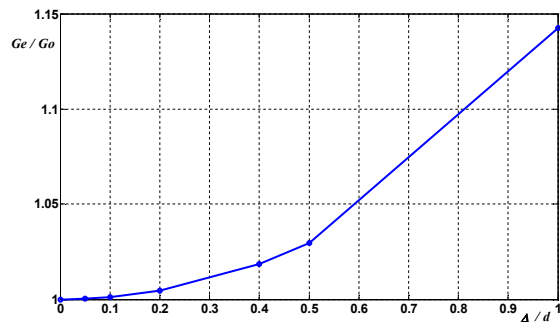


Рис.3 – Вплив ексцентриситету на активну провідність ізоляції коаксіального радіочастотного кабелю

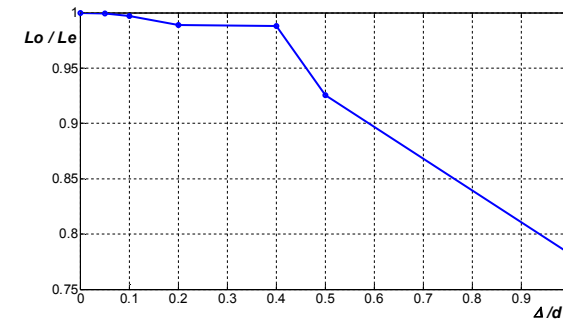


Рис.4 – Вплив ексцентриситету на загальну індуктивність коаксіального радіочастотного кабелю

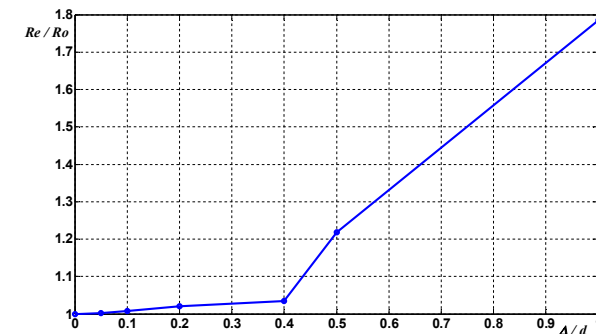


Рис.5 – Вплив ексцентриситету на активний опір провідників коаксіального радіочастотного кабелю

Аналіз літературних джерел показує [7], що розрахунки хвильового опору при наявності ексцентриситету ведуться по спрощеній формулі (2) шляхом підстановки виразів для індуктивності та ємності:

$$Z = 59,952 \frac{\ln(x + \sqrt{x^2 + 1})}{\sqrt{\epsilon_e}}, \text{ Ом} \quad (3)$$

де $x = \frac{1}{2} \left[\frac{d}{b} + \frac{4H}{d} \left(1 - \frac{H}{b} \right) \right]$ (позначення показано на рис. 1б), ϵ_e – еквівалентна діелектрична проникність матеріалу ізоляції.

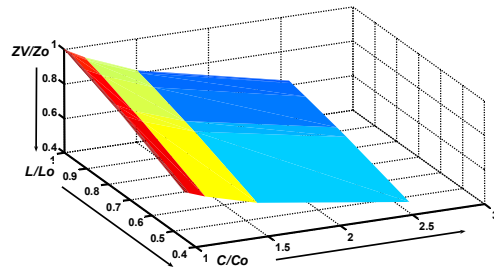


Рис. 6 – Вплив ексцентриситету Δ на загальну індуктивність, електричну ємність та хвильовий опір коаксіального радіочастотного кабелю (з індексами «o» позначені параметри без ексцентриситету)

На основі виконаних розрахунків доведено, що урахування зміни всіх первинних параметрів при наявності ексцентриситету Δ в конструкції коаксіального радіочастотного кабелю призводить до менших відхилень хвильового опору (рис.7, крива 1) в порівнянні з розрахунком, який базується тільки на врахуванні самого геометричного фактору [7] (рис.7, крива 2).

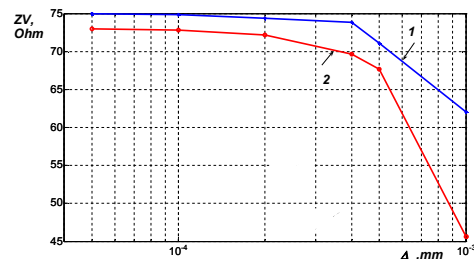


Рис. 7 – Динаміка зміни хвильового опору в залежності від значення ексцентриситету в радіочастотному кабелі з урахуванням спотворення електромагнітного поля (1) та без урахування (2) [7]

Вплив еліптичності на хвильовий опір кабелю. При наявності еліптичності також спостерігається відхилення хвильового опору від номінального значення: при еліптичності внутрішнього провідника хвильовий опір зменшується (рис.8), при еліптичності ізоляції – навпаки, збільшується (рис.9). Для забезпечення хвильового опору в межах нормованих відхилень $\pm 2,5\%$ еліптичність внутрішнього провідника не повинна перевищувати 20 - 22% (рис.8), ізоляції – 27 - 25% (дивись рис.9). Інакше ці складові призведуть до виходу відхилення хвильового опору за межі допустимого, тому що при виготовленні кабелів завжди присутні допуски на діаметр провідника та діаметр по ізоляції.

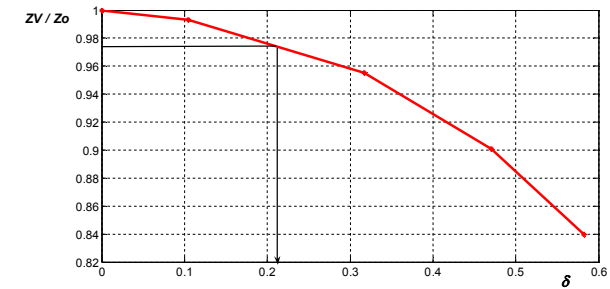


Рис. 8 – Вплив на хвильовий опір еліптичності внутрішнього провідника кабелю

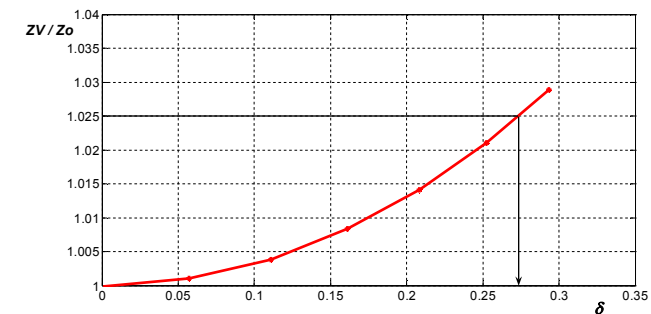


Рис. 9 – Вплив на хвильовий опір еліптичності ізоляції коаксіального радіочастотного кабелю

Висновки. Таким чином, наявність ексцентриситету та еліптичності в конструкції коаксіального радіочастотного кабелю призводять до спотворення електромагнітного поля, що зумовлює флуктуації хвильового опору. Точність визначення відхилень хвильового опору за результатами чисельних розрахунків з урахуванням зміни всіх первинних параметрів в 3 рази вища, ніж за формулою (3), яка не враховує спотворення активного опору та активної провідності ізоляції.

На основі розрахунків обґрунтовано припустимі значення ексцентриситету, еліптичності внутрішнього провідника та ізоляції. Це призводить до більш точного налаштування технологічного обладнання та системи контролю за технологічним процесом при виготовленні кабелів з меншими відхиленнями хвильового опору.

Список літератури: 1.Безпрозванних Г.В. Вплив конструктивних та технологічних неоднорідностей на хвильовий опір коаксіальних радіочастотних кабелів. / Г.В.Безпрозванних, А.М. Бойко, О.Г.Кессаєв // - Електротехніка і Електромеханіка. – Харків, 2013 р. – № 2, 57 – 61 с. 2.Гальперович Д.Я. Радиочастотные кабели / Д.Я.

Гальперович, А.А. Павлов, Н.Н. Хренков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с. 3. Безпрозванных Г.В. Влияние эксцентриситета на напряженность электрического поля в кабелях коаксиальной конструкции / Г.В. Безпрозванных, И.А. Морозов, О.Г. Кессасев // - Тезисы доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. 4. Безпрозванных А.В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А.В. Безпрозванных, Б.Г. Набока // Навчальний посібник. - Харків: НТУ «ХПІ», 2012. - 108. 5. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: [учебное пособие для студентов электроэнергетических специал.] / Б.Г. Набока - К: ИСДО, 1995.- 120с. 6. Кессасев О.Г. Обґрунтування значень эксцентриситету коаксіального кабелю / Г.В. Безпрозванных, О.Г. Кессасев // - Тезисы доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. 7. Ганстон М.А.Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / М.А.Р. Ганстон – М.: Связь. – 1976. – 150 с.

Надійшла в редколегію 07.10.2013

УДК 621.315

Влияние на параметры передачи эксцентриситета та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів / О.Г. Кессасев // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Енергетика: надійність і енергоспоживання. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 62 – 69. – Бібліогр.: 7 назв.

На основании численных расчетов выполнен анализ влияния на волновое сопротивление эксцентриситета и эллиптичности коаксиальных радиочастотных кабелей. Показано, что учет изменения всех первичных параметров в неоднородной конструкции кабеля приводит к повышению точности в определении волнового сопротивления.

Ключові слова: коаксіальні радіочастотні кабелі, эксцентриситет, еліптичність, хвильовий опір.

Based on numerical calculations performed analysis of the impedance eccentricity and ellipticity of RF coaxial cables. It is shown that taking into account the changes of all parameters in the inhomogeneous initial design of the cable increases the accuracy in determining the wave resistance.

Keywords: RF coaxial cables, eccentricity, ellipticity, impedance.

УДК 621.315.2

И. А. КОСТЮКОВ, аспирант НТУ «ХПИ»

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКЕ БРОНИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

Получен ряд, которым описывается распределение радиальной компоненты напряженности магнитного поля и магнитной индукции в ферромагнитной проволоке брони одножильного силового кабеля в приближении двухмерного поля.

Ключевые слова: уравнение Гельмгольца, радиальная составляющая напряженности магнитного поля, вектор Пойнтинга.

Введение. Протекание продольных и вихревых токов в экранах, броне и оболочках однофазных силовых кабелей является одним из тех факторов, которые влияют на пропускную способность кабельной линии, а также на надежность ее в эксплуатации. Указанное обстоятельство определяет необходимость анализа влияния, как конструктивного исполнения однофазных кабелей, так и различных аспектов связанных со способами их прокладки, заземления и соединения экранов (оболочек) на величину продольных и вихревых токов.

Практические рекомендации относительно учета влияния потерь, обусловленных протеканием продольных и вихревых токов, можно найти, например, в [1, 2]. При этом многие математические модели являются достаточно универсальными, в том смысле что могут использоваться как для определения потерь в сплошных оболочках силовых кабелей (гладких и гофрированных), так и в проволочных, электрически неоднородных, экранах. Важно отметить, что именно протекание продольных токов в большой степени ограничивает пропускную способность кабельных линий. Согласно рекомендациям [1, 2] для случая соединения экранов (оболочек) с двух сторон (для не бронированных кабелей), то есть при совместном действии продольных и вихревых токов, рекомендуется учитывать только потери от продольных токов. Кроме, впрочем, случаев кабелей с большими сегментными жилами, то есть при наличии эффекта близости. Также важно отметить, что для одножильных силовых кабелей, в конструкции которых присутствует броня из ферромагнитного материала, рекомендации, которые

© И. А. Костюков, 2013

приведены в [1, 2], дают несколько завышенные значения для суммарных потерь в броне и оболочке кабеля, для обеспечения безопасной работы при номинальной нагрузке. Кроме того магнитная броня в конструкции кабеля делает значительно более важным фактор потерь от вихревых токов. Это обуславливает необходимость разработки математических моделей для определения распределения вихревых токов в броне силовых кабелей и экспериментальной их проверки. Относительно простой, допускающей аналитическое решение, является задача определения потерь, обусловленных протеканием вихревых токов, в сплошном цилиндрическом экране одножильного кабеля. Решение данной задачи легко можно найти, например, в [3, 4]. Так, распределение напряженности магнитного поля в сплошном цилиндрическом экране описывается выражением [3]:

$$H_m = H_{0m} \frac{\ker' x + jkei'x}{\ker' x_0 + jkei'x_0}, \quad (1)$$

где $x = r(\omega\mu\gamma)^{0.5}$, μ – абсолютная магнитная проницаемость, γ – удельная объемная проводимость, ω – угловая частота, H_{0m} – напряженность магнитного поля на внутренней поверхности экрана, $\ker' x$ и $kei'x$ – производные функций Кельвина второго рода.

Заметим, что рассматривая гармонические поля, в дальнейшем при записи векторов напряженности электрического и магнитного полей, будем подразумевать их комплексные амплитуды, то есть комплексные числа с модулем равным амплитуде функции, которая описывает гармонические колебания напряженности электрического и магнитного полей, и аргументом, равным ее начальной фазе. Распределение напряженности электрического поля в сплошном экране дается выражением [3]:

$$E_m = j \sqrt{\frac{\omega\mu}{\gamma}} H_{0m} \frac{\ker x + jkeix}{\ker x_0 + jkeix_0}, \quad (2)$$

На рис. 1 приведено распределение напряженности магнитного поля по экрану (вещественная часть). Расчеты выполнены при ориентировочном радиусе жилы 11 мм, толщине оболочки (экрана) 3 мм, расстоянии между осью жилы кабеля, совпадающей с осью цилиндрической системы координат, и внутренней поверхностью оболочки 28 мм. Ток жилы принимался равным 200, 250, 300 А.

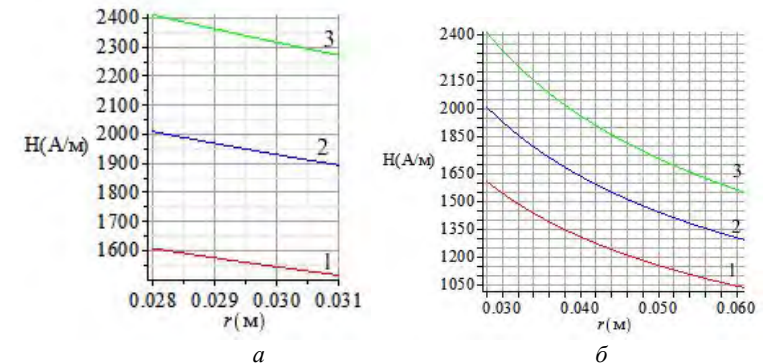


Рис. 1 – Распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в сплошном экране: а – толщиной 3 мм; б – толщиной 33 мм.

Линейная зависимость, приведенная на рис. 1 (а) недостаточно наглядна, что связано с малой толщиной оболочки. На рис. 1 (б) для наглядности приведено аналогичное распределение напряженности магнитного поля для экрана (конечно, не встречающегося на практике) с внутренним радиусом 28 мм, а внешним 61 мм.

Цель и основной материал исследований. Цель статьи – разработка приближенной математической модели для определения радиальной составляющей напряженности магнитного поля в проволоке брони силового кабеля. При этом, в целях упрощения, в первом приближении не будем учитывать спиральную геометрию проволоки, ограничившись случаем плоскопараллельного поля, также не будем учитывать влияния продольных токов. Кроме того будем пренебрегать влиянием вихревых токов, индуцированных в оболочке кабеля, на радиальную составляющую напряженности магнитного поля в брони. Материал проволоки будем считать однородным и изотропным. Влияние оболочки на амплитуду поля можно учесть, рассчитав распределение напряженности магнитного поля по толщине оболочки (формула (1)). Не будем также учитывать нелинейность магнитной проницаемости, которую в дальнейшем можно попытаться учесть с привлечением, например, метода Неймана. При таких приближениях для определения потерь энергии в проволоке, обусловленных протеканием вихревых токов, как и для случая сплошного экрана [3], будем рассматривать поток комплексного вектора Пойнтинга в радиальном направлении, который можно получить, имея векторное произведение продольной составляющей напряженности электрического поля на комплексно сопряженное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, обусловленное источником возмущения:

$$P = \frac{1}{2} (E_z \times H_\varphi) \quad (3)$$

При этом в квазистационарном приближении тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля возбуждения в диэлектрике может вычисляться из закона полного тока. На рисунке 3 схематически показаны радиальная и тангенциальная (к поверхности проволоки) компоненты напряженности магнитного поля

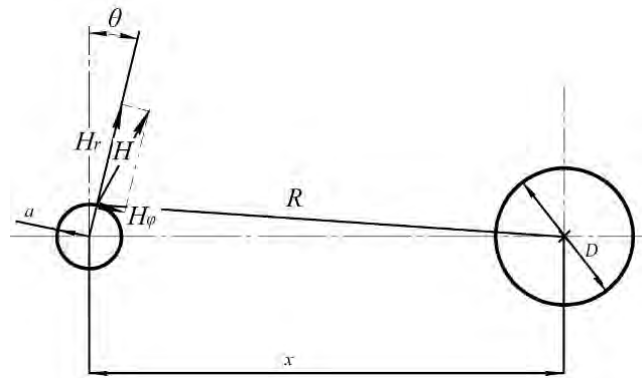


Рис. 2 – Схема к определению геометрических параметров для вычисления радиальной составляющей напряженности магнитного поля

Для такой схемы распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки будем определять из выражения [5]:

$$H_r = \frac{I}{2\pi} \frac{x \cos \theta}{(x^2 + a^2 - 2xa \sin \theta)} \quad (4)$$

где a – радиус проволоки, x – расстояние между центрами жилы и проволоки брони, (в формуле (4) следует учитывать действующее значение тока). На рис. 3 приведено распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки при амплитудном значении тока в жиле 100 А, 150 А, 200 А, 250 А, (соответственно кривые 1, 2, 3, 4) диаметре проволоки $D = 2a = 3$ мм расстоянии между осями проволоки и жилы кабеля $x = 27$ мм диаметре жилы кабеля $D = 18$ мм.

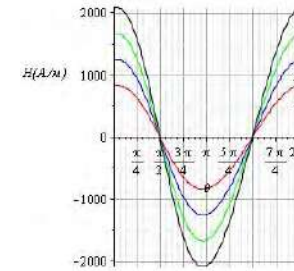


Рис. 3 – Распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки

Как видно из кривых, представленных на рисунке (3), распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки имеет ярко выраженный максимум при значениях $\theta = 0, 2\pi$, и минимум при $\theta = \pi$, в этих точках напряженность магнитного поля имеет только радиальную составляющую. В точках перехода кривой через нуль, например, при $\theta = \pi/2$, напряженность магнитного поля имеет только тангенциальную составляющую.

В приближении плоскопараллельного поля, то есть при пренебрежении спиральностью проволоки, напряженность электрического поля будет иметь только составляющую вдоль линий протекания вихревых токов $E = E_z$. Тогда рассмотрим стандартную краевую задачу для уравнения Гельмгольца в цилиндрической системе координат (совмещая ось проволоки с осью системы координат), относительно аксиальной составляющей напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} - k^2 E = 0, \quad (5)$$

где $k = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$

Известно, что решение (5), при соответственном выборе констант разделения, можно записать в виде:

$$E(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi)(C_n I_n(kr) + D_n K_n(kr))$$

где $I_n(kr)$ и $K_n(kr)$ модифицированные функции Бесселя, соответственно первого и второго рода порядка n . Учитывая характер изменения функции Макдональда, согласно которому $K_n(0) = \infty$, а также необходимость ограничения решения в нуле в (6) следует принять все $D_n = 0$, следовательно, второе линейно-независимое решение дифференциального уравнения для определения функции $R(r)$ отбрасывается. В таком случае решение будет иметь вид:

$$E(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) I_n(kr), \quad (7)$$

где все постоянные интегрирования учтены в A_n и B_n .

Радиальная составляющая напряженности магнитного поля $H = Hr$ определяется из:

$$H_r = -\frac{1}{j\omega\mu r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \quad (8)$$

Действительно, запишем второе уравнения Максвелла в комплексной форме:

$$-j\omega\mu H = \text{rot}E \quad (9)$$

Расписав ротор в цилиндрической системе координат, из (9) можно получить выражение для радиальной составляющей напряженности магнитного поля:

$$-j\omega\mu H_r = \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} \quad (10)$$

Откуда, с учетом приближения плоскопараллельного поля, а также наличия только аксиальной составляющей напряженности электрического поля можно получить равенство (8).

Таким образом, распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля в ферромагнитной проволоке брони кабеля можно описывать рядом:

$$H(r, \varphi) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(B_n \cos n\varphi - A_n \sin n\varphi) n I_n(kr)}{j\omega\mu r}, \quad (11)$$

Для определения постоянных интегрирования в (11) следует положить $r = a$, (радиус жилы). Кроме того заметим, что на границе раздела диэлектрика и ферромагнитной проволоки радиальные составляющие магнитной индукции непрерывны, поскольку поле магнитной индукции соленоидально, и, соответственно, радиальные составляющие напряженности магнитного поля распределяются в соответствии с магнитными проницаемостями:

$$H_{r1}\mu_1 = H_{r2}\mu_2, \quad (12)$$

$$\mu_1 f(\varphi) = -\mu_2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(B_n \cos n\varphi - A_n \sin n\varphi) n I_n(ka)}{j\omega\mu_2 a}, \quad (13)$$

где $f(\varphi)$ – граничное условие, определяющее распределение напряженности радиальной составляющей напряженности магнитного поля в ферромагнитной проволоке, μ_1, μ_2 – магнитные проницаемости на границе раздела двух сред с различными магнитными характеристиками. Вычислив радиальную составляющую напряженности магнитного поля на поверхности проволоки, (формула

(4), ток жилы 100 А), для удобства последующих вычислений аппроксимируем ее полиномом. При вычислении по формуле (4) угол θ отсчитывался, как и показано на рис. (3). При аппроксимации полярный угол φ отсчитывался от оси, соединяющей центры жилы кабеля и проволоки. Расчеты выполнены при токе в жиле 100 А, (амплитудное значение), диаметре проволоки $D = 2a = 3$ мм, расстоянии между осями проволоки и жилы кабеля $x = 27$ мм, диаметре жилы кабеля $D = 18$ мм. Полином имеет вид:

$$f_1(\varphi) = -0,00002316098027\varphi^4 + 71,47502371\varphi^3 - 673,6340591\varphi^2 + 1410,853725\varphi$$

С учетом формулы (12) полином (14), описывающий теперь распределение радиальной составляющей магнитной индукции на поверхности проволоки, запишется в виде:

$$f_2(\varphi) = -2,909019122 \cdot 10^{-11} \varphi^4 + 0,0008977262978 \varphi^3 - 0,0008460843782 \varphi^2 + 0,001772032279 \varphi \quad (15)$$

Формула (13), с учетом (15), для определения постоянных интегрирования примет вид:

$$f_2(\varphi) = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(B_n \cos n\varphi - A_n \sin n\varphi) n I_n(ka)}{j\omega a}, \quad (16)$$

Из (16) можно получить выражения для определения постоянных интегрирования. Умножая (16) на $\cos(n\varphi)$ и интегрируя в пределах от 0 до 2π , замечаем, что вследствие ортогональности тригонометрических функций все слагаемые, в которых содержатся произведение косинусов и синусов, обратятся в нуль. Кроме того, примем первую гармонику равной нулю. Тогда можно записать выражения для всех постоянных интегрирования B_n .

$$B_n = -\frac{j\omega a}{\pi n I_n(ka)} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \cos n\varphi d\varphi, \quad (17)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Для нахождения постоянных интегрирования A_n повторим ту же процедуру, с той разницей что (16) умножается на $\sin(n\varphi)$.

$$A_n = \frac{j\omega a}{\pi n I_n(ka)} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin n\varphi d\varphi, \quad (18)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Таким образом, решение краевой задачи для определения радиальной составляющей напряженности магнитного поля с граничным условием, определяемым формулой (4), дается рядом (11), в котором все постоянные интегрирования находятся по формулам (17) и (18).

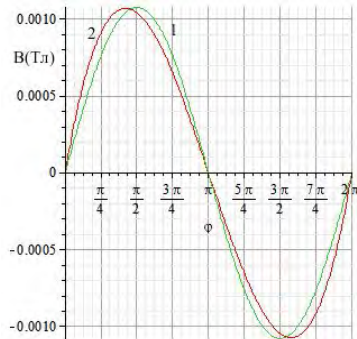


Рис. 4 – Распределение радиальной составляющей магнитной индукции на поверхности проволоки, вычисленное по формулам 15 (кривая 2)) и 11 (кривая 1))

Получен ряд, аналитически описывающий распределение радиальной компоненты напряженности магнитного поля и магнитной индукции по сечению ферромагнитной проволоки брони силового кабеля. Косвенной оценкой правильности полученного решения могут служить кривые, приведенные на рисунке 4, согласно которым распределение, вычисленное суммированием ряда (11), при $r = a$ достаточно хорошо совпадает с поведением полинома (15), который определяет граничное условие рассматриваемой краевой задачи. Источниками расхождений в поведении двух кривых, а также неточностей в решении поставленной задачи, видимо, являются как погрешности обусловленные аппроксимацией граничного условия, так и погрешности обусловленные суммированием ограниченного числа гармоник в формуле (16).

Актуальным является продолжение работы по аналитическому определению, с экспериментальной проверкой, потерь, обусловленных протеканием вихревых токов, при намагничивании спиральной проволоки брони кабеля, с учетом ее реальной геометрии, тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, которая определяется потоком вектора Пойнтинга в радиальном направлении.

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1: Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100%) і обчислення втрат. Загальні положення. 2. IEC 287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating-Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses Section 1 – General 1995. 3. Туровский Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский. – М. : Энергия, 1974. – 448 с. 4. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин / Я. Туровский. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 200 с. 5. Перекалин М. А. Исследование индуцированных токов в цилиндрических алюминиевых кожухах трехфазного токопровода / М. А.

Перекалин, Р. И. Кареев // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1960. – № 8. – С. 55 – 65.

Надійшла до редколегії 02.10.13.

УДК 621.315.2

Приближенная оценка радиальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля / И. А. Костюков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 70–78. – Бібліогр.: 5 назв.

Отриманий ряд яким описується розподіл радіальної компоненти напруженості магнітного поля та магнітної індукції у феромагнітному дроті броні одножильного силового кабелю у наближенні двовимірного поля.

Ключові слова: рівняння Гельмгольца, радіальна складова напруженості магнітного поля, вектор Пойнтинга.

Row for the description of the radial component of magnetic field induction and magnetic field tension distribution in of power cable armor wire is obtained.

Keywords: Helmholtz equation, radial component of magnetic field tension, Poynting vector

А.П.ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»;
Н.М.КРУГОЛ, студент, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТЭЦ ПО ТЕПЛОВОМУ ГРАФИКУ НАГРУЗКИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

В статье рассмотрены особенности работы ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период. Предложено использовать частотные преобразователи для питания групп двигателей собственных нужд ТЭЦ, при этом используя сеть частотой 50 Гц как резервный источник питания.

Ключевые слова: ТЭЦ, собственные нужды, преобразователь частоты, схема с двумя системами шин, теплофикация.

Повышение энергоэффективности систем теплофикации является очень актуальной задачей в современных условиях. Теплофикация - энергоснабжение потребителей тепловой и электрической энергии на базе комбинированного производства тепла и электроэнергии одной технологической установкой.

Используемое при теплофикации тепло, как правило, является продуктом отходов производства при выработке электроэнергии. Вместо того чтобы бесполезно отдавать это тепло в окружающую среду, его можно применить для обогрева зданий и целых кварталов города. Чем дальше удалено местонахождение источника от потребителя, тем больше тепла теряется при его транспортировании. Поэтому для теплофикации предпочтительнее использовать электростанции небольшой мощности вблизи районов концентрации населения, а не крупные, но удаленные от мест потребления. Таким образом, одним из главных преимуществ теплофикации является то, что, наряду с экономией производственного пространства, достигается лучшее использование произведенной энергии, и поэтому стоимость такого тепла сравнительно низка.

В Украине на сегодняшний день успешно работают ряд ТЭЦ (Дарницкая ТЭЦ, Сумская ТЭЦ, Харьковская ТЭЦ-3 и др.) по теплофикационному циклу, где турбины работают с ухудшенными параметрами по вакууму, когда в конденсатор подается для охлаждения сетевая вода, либо используются турбины с противодавлением, где отработанный пар сбрасывается в сетевые бойлеры.

При работе таких ТЭЦ, в летний период, когда значительно

© А. П. Лазуренко, Н. М. Кругол, 2013

уменьшается спрос на тепло, возникают проблемы с работой оборудования в ненормальных (недогруженных) режимах, что приводит к дополнительным потерям электрической энергии в механизмах собственных нужд электростанции.

Из 21 Украинских ТЭЦ, которые входят в ассоциацию «УкрТЭЦ», всего 6 работает на угле, а это означает, что в условиях стратегии Украины, направленной на уменьшение потребления природного газа, данные ТЭЦ в летний период не могут работать по конденсационному циклу, а следовательно, им необходимо либо простаивать, либо искать возможность внедрять когенерацию, переводить турбины на работу с ухудшенным вакуумом. При таких обстоятельствах нагрузка ТЭЦ в летний период уменьшается в 4-6 раз, по сравнению с зимней, возникают проблемы эксплуатации ТЭЦ. Одной из них является экономичное использование механизмов собственных нужд станции, которые в основном проектировались для работы в номинальных режимах работы.

В целом теплоснабжение в Украине характеризуется весьма низкой энергоэффективностью, причины которой обусловлены, помимо чрезмерной централизации систем теплоснабжения и большой степени износа теплогенерирующего оборудования и тепловых сетей, применением насосных и вентиляторных установок с большим запасом по мощности. Как следствие, излишки давления гасятся дросселирующими устройствами, что ведет к непроизводительным потерям электроэнергии. За счет потери давления на этих задвижках перерасход потребляемой электроэнергии, например, мощными сетевыми насосами достигает 50%.

Общепризнанным средством энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе и выходом в данной ситуации может быть применение современных энергоэффективных частотно-регулируемых преобразователей для электроприводов основных механизмов собственных нужд ТЭЦ. Частотные приводы сегодня широко используются в системах питания собственных нужд генерирующих и распределяющих энергообъектов. Использование их в режиме частотный преобразователь – двигатель дает значительную экономию электроэнергии. Причем, кроме исключения дросселирования, регулируемый электропривод также обеспечивает многие важные технологические возможности.

Начальные капиталовложения для реализации таких проектов являются существенными, поскольку на ТЭЦ установлено большое количество механизмов, и для каждого из них необходимо устанавливать свой частотный привод, это усложняет и удорожает схему питания механизмов и схему АВР. Выходом из данной ситуации

может быть установка одного частотного преобразователя для питания нескольких двигателей (групп потребителей близкого режима работы).

Электроприводы основных механизмов ТЭЦ относятся к категории ответственных. Многие из них определяют работоспособность всей теплосети. К таким, в первую очередь, относятся сетевые насосы и насосы рециркуляции. От других, таких как тягодутьевые механизмы, зависит работа котлоагрегатов ТЭЦ. Преобразователи частоты чувствительны к кратковременным посадкам питающего напряжения, что может привести к аварийным остановам механизмов, а вместе с этим, зачастую, к аварийным ситуациям в тепловой сети. Поэтому, исходя из требований надежности, можно использовать резервирование питания двигателей от традиционной сети частотой 50Гц, используя при этом схему с двумя системами шин, приведенную на рис. 1.

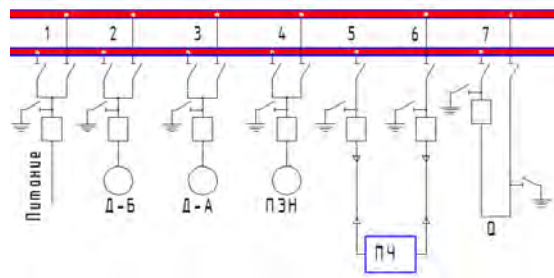


Рис. 1 – Схема питания механизмов собственных нужд ТЭЦ от преобразователя частоты

Питание подается на рабочую систему шин, с которой питается частотный привод, выход привода подключается на резервную систему шин. При работе питательного насоса, дымососа и вентилятора горячего дутья от частотного преобразователя, их схемы собираются на резервную систему шин. Если происходит отказ частотного преобразователя, то выключатель Q6 отключается, и включается шиносоединительный выключатель Q, и на механизмы собственных нужд подается питание от сети с частотой 50Гц. Время перерыва питания в данном случае определяется лишь временем срабатывания выключателей и схемы АВР.

С помощью комбинированного управления (питания) производительность механизмов собственных нужд будет регулироваться изменением частоты с помощью преобразователя в основном и дросселированием на каждом конкретном механизме. В

данном случае частота питания напряжения преобразователя частоты будет определяться как минимально допустимая по условиям нормальной работы ТЭЦ. Так, например, для котла определяющими параметрами будут напор и расход питательной воды, расход воздуха, разрежение в топке и др.

Основным эксплуатационным документом котла является его режимная карта, по ней можно определить загрузку основных механизмов собственных нужд котла. На рисунке 2 представлены параметры вентилятора горячего дутья (ВГД) (его производительность и давление воздуха перед горелками) как функция от производительности котла.

На сегодняшний день на большинстве станций производительность ВГД регулируется шиберами, что приводит к дополнительным потерям электрической энергии в двигателях, приводящих в движение рабочее колесо механизма. Эта энергия расходуется на преодоление сопротивления дросселя регулирования, что с точки зрения энергоэффективной работы является нецелесообразным и недопустимым.

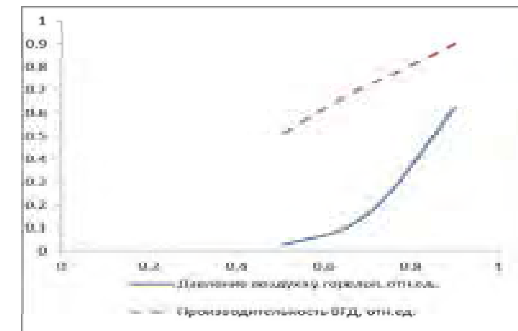


Рис. 2 – Параметры ВГД при работе котла в ненормальном режиме

При питании нескольких механизмов от одного частотного привода необходимо создать такую систему управления, которая могла бы обеспечить высокую надежность и экономичность работы энергетического котла.

Основными параметрами котла, которые такая система управления должна контролировать, являются паропроизводительность и давление пара в барабане котла. Так, например, при снижении давления пара в барабане котла, необходимо приоткрыть газовый клапан для увеличения количества сжигаемого газа, что приведет в свою очередь к увеличению расхода воздуха.

В обычной системе регулирования в этой ситуации приоткроется шибер ВГД и дымососа, а в предлагаемой увеличится частота питающего напряжения а следовательно и расход воздуха через котел.

Немаловажным является использование режима плавного пуска, поскольку, это дает возможность значительно повысить срок службы двигателей и приводных механизмов.

Для окончательного принятия решения о возможности такого питания собственных нужд необходимо рассмотреть вопросы надежной работы каждой группы основных механизмов и агрегатов с точки зрения обеспечения оптимальных режимов работы технологического оборудования. Проанализировать на основе моделей их работу в нормальных, переходных и аварийных режимах, вопросы защиты от перенапряжений и самозапуска двигателей, разработать алгоритмы управления частотным преобразователем в указанных режимах, а также разработать рекомендации по повышению надежности работы частотно-регулируемого привода. Результаты этих исследований будут опубликованы в следующих статьях авторов.

Список литературы: 1. Тепловое оборудование и тепловые сети/ Г.В.Арсеньев, В.П.Белюсов, А.А.Дронченко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 400с. 2. Электрическая часть электростанций/ С.В.Усов, Б.Н.Михаев, А.К.Череповец и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616с.

Поступила в редколлегию 09.12.2013

УДК 621.311

Анализ работы ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период /

Лазуренко А.П., Кругол Н.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - № 59 (1032). – С. 79 - 83

В статті розглянуті особливості роботи ТЕЦ по тепловому графіку навантаження в літній період. Запропоновано використання перетворювачів частоти для живлення груп двигунів власних потреб ТЕЦ, при цьому використовуючи мережу частотою 50Гц як резервне джерело живлення. Іл.: 2. Табл.: 0. Бібліогр.: 2 назв.

Ключові слова: ТЕЦ, власні потреби, перетворювач частоти, схема з двома системами шин, теплофікація.

The article describes the features of the CHP thermal loading schedule in the summer. Proposed use of the frequency converters for powering the group's own needs CHP engines, while using a network frequency of 50 Hz, as a backup power source. Fig.: 2. Tabl: 0. Bibliogr.: 2 title.

Keywords: CHP, own need, the scheme with two systems tyres, cogeneration

УДК 621.315

С.Г. ЛОМОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЛЕКТОРА МПТ (Часть 1)

Теоретически показана возможность увеличения электрической прочности коллектора машин постоянного тока за счет применения в поверхностном слое межламельной изоляции композиционного диэлектрического материала с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: изоляция, коллектор машин постоянного тока.

Введение. Повышение питающего напряжения – одна из основных возможностей повышения удельной мощности машин постоянного тока (МПТ). Одним из основных сдерживающих факторов повышения этого напряжения является электрическая прочность коллектора МПТ. Под термином «электрическая прочность коллектора» здесь и ниже понимается стойкость коллектора МПТ к возникновению, как полного газоразрядного пробоя по его поверхности между щеточными траверсами (круговой огонь), так и частичных разрядов между смежными коллекторными пластинами (вспышки на коллекторе). В основе всех современных практических критериев электрической прочности коллектора МПТ лежат величины межламельного напряжения или его градиента. Однако, опыт эксплуатации крупных и напряженных в потенциальном отношении МПТ дает примеры того, что возникают перекрытия по коллектору у машин, обладающим значительным теоретическим запасом электрической прочности коллектора по всем известным критериям. Очевидно, что межламельный промежуток на коллекторе, как и весь токосъемный узел МПТ должны стать предметом более детального изучения с точки зрения происходящих в них процессов.

Несмотря на важность вопроса об электрической прочности коллектора, в теории возникновения и развития кругового огня на коллекторе до настоящего времени много спорных положений, отсутствует единая точка зрения на причину возникновения, развития и количественных критериев этого явления. Эти обстоятельства заставляют проектировщиков быть осторожными в увеличении питающего напряжения МПТ.

Анализ публикаций. В настоящее время существуют две основные теории возникновения кругового огня. Первая считает, что

© С. Г. Ломов, 2013

инициатором кругового огня является поверхностный пробой изоляции двух смежных коллекторных пластин в области максимальных межламельных напряжений, который в литературе называется «единичной вспышкой» [2,3]. Вторая теория считает, что повышение напряжения между смежными коллекторными пластинами играет лишь вспомогательную роль в возникновении кругового огня. По этой теории начальная дуга загорается на коллекторе под щеткой в результате расстройств коммутации или механических причин (подпрыгивание щетки вытягивается из-под последней и поддерживается между сбегающей гранью щетки и уходящими из-под неё коллекторными пластинами. По мере продвижения дуги увеличение напряжения между смежными пластинами поддерживает дугу [4]. Некоторые авторы пытаются объединить изложенные выше два основных взгляда на природу возникновения кругового огня, показывая, что эти теории не противоречат, а дополняют друг друга. Мы считаем, что каков бы ни был истинный механизм и причины возникновения кругового огня, величина напряжения между смежными коллекторными пластинами является основным фактором, определяющим протекание этого процесса.

Целью данной работы. Теоретическое и экспериментальное исследования возможности повышения питающего напряжения МПТ большой и предельной мощностей без изменения электромагнитных и геометрических параметров МПТ.

Основной материал исследований. Рассмотрим поверхностный (загрязненный) слой межламельной изоляции на коллекторе МПТ. Для расчета токов и напряжений в этом слое воспользуемся методом эквивалентных схем. В 1940 году Мантров М.И. в [1] впервые предложил этот метод для расчета тока и напряжения по поверхности проходного изолятора. Межламельный промежуток на коллекторе МПТ может быть представлен эквивалентной схемой, представленной на рис. 1.

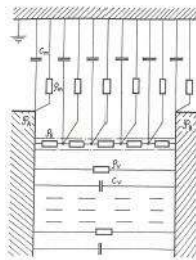


Рис. 1 – Эквивалентная схема межламельного промежутка

Штрих-пунктирными линиями выделен рассматриваемый слой загрязнения или в общем случае поверхностный слой межламельной изоляции с удельным сопротивлением току проводимости ρ_s . Между смежными коллекторными пластинами существует удельное объемное сопротивление ρ_v и удельная емкостная связь c_v . Воздушный промежуток над поверхностным слоем изоляции обладает распределенной удельной емкостью c_m . Теоретически воздушный промежуток обладает удельным сопротивлением ρ_m . При расчетах по данной эквивалентной схеме приняты следующие допущения: коллектор в осевом направлении является бесконечным и величины ρ_s , ρ_m , c_m , c_v считаются на один метр длины коллектора; распределенная удельная емкость c_m одинакова по всей ширине межламельного промежутка и существует только над поверхностью изоляции; потенциалы θ_A и θ_B изменяются по синусоиде и синфазно; токи, протекающие в объеме межламельной изоляции, значительно меньше поверхностных токов и они исключены из рассмотрения. На рис. 2 схематически показаны токи, протекающие на поверхности межламельной изоляции.

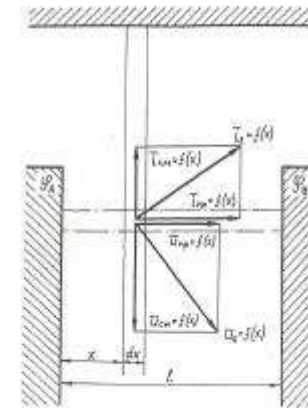


Рис. 2 – Токи на поверхности межламельной изоляции

При известном спектральном анализе кривой межламельного напряжения метод расчета тока в поверхностном слое изоляции заключается в следующем: 1) Рассчитывается в нескольких определенных точках n по ширине l межламельного промежутка вектор тока \vec{i}_s , соответствующий первой гармонике межламельного напряжению. При этом величина потенциала θ_B принимается равной якорному напряжению МПТ, а потенциал θ_A меньше на максимальную величину межламельного напряжения данной гармонике в данной

точке коллектора. 2) В тех же точках и рассчитывается вектор тока \vec{i}_s для последующих гармоник v . При этом потенциал θ_A принимается равным нулю, а потенциал θ_B равным части межламельного напряжения для соответствующей гармоники. Для рассматриваемого диапазона частот удельные емкостные параметры на коллекторе МПТ принимаются постоянными. 3) В каждой точке и рассчитывается вектор тока $\sum_{i=1}^v \vec{i}_s$ как геометрическая сумма векторов \vec{i}_s для всех рассмотренных гармоник. 4) Рассчитывается вектор тока \vec{I}_s , как среднее значение вектора тока $\sum_{i=1}^v \vec{i}_s$ по ширине межламельного промежутка.

$$\vec{I}_s = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^v \vec{i}_s \right)}{n} \quad (1)$$

Модуль вектора поверхностного тока $|\vec{I}_s|$, по нашему мнению может служить объективным критерием стойкости коллектора МПТ к возникновению кругового огня. Рассмотрим решение для поверхностного тока при синусоидальном межламельном напряжении. Воспользовавшись первым и вторым законами Кирхгофа можно записать систему уравнений для тока и напряжения на поверхности изоляции межламельного промежутка в соответствии с эквивалентной схемой.

$$-\frac{d\vec{i}_s}{dx} = \vec{\sigma} \times \left(\frac{d\vec{u}_s}{dx} \right) \quad (2)$$

$$-\frac{d\vec{u}_s}{dx} = \vec{Z} \times \vec{i}_s, \quad (3)$$

где $\vec{\sigma} = (1/\rho_s + 1/\rho_m) + j\omega t$, $\vec{Z} = (\rho_s + \rho_m) + j(1/\omega C_m)$ (4)

При синусоидальной форме приложенного к межламельному промежутку напряжения:

$$\vec{u}_s = \vec{U}_s \times \exp(j\omega t); \quad \vec{i}_s = \vec{I}_s \times \exp(j\omega t) \quad (5)$$

система уравнений (2,3) переписывается в виде:

$$-\frac{d\vec{I}_s}{dx} = (\vec{\sigma} + j\omega \vec{C}_m) \times \vec{U}_s \quad (6)$$

$$-\frac{d\vec{U}_s}{dx} = \vec{Z}_s \times \vec{I}_s \quad (7)$$

Мы получили систему уравнений для векторов, сдвинутых только в пространстве. Были рассчитаны по (6,7) несколько сотен вариантов изменения поверхностного тока при изменении параметров межламельного промежутка $\vec{I}_s = \psi(c_m, \rho_s, \theta_A, \theta_B, l, f)$. Расчеты показали значительное влияние емкостной составляющей на величину полного поверхностного тока межламельной изоляции коллектора МПТ, особенно при наличии в спектре межламельного напряжения высокочастотных гармоник.

Естественным является вопрос, если определяемый нами полный поверхностный ток $|\vec{I}_s|$ является одним из критериев электрической прочности коллектора, то есть ли у нас возможность уменьшения величины этого тока и тем самым увеличения электрической прочности коллектора без изменения геометрических и электромагнитных параметров самой МПТ. Составляющая тока проводимости \vec{i}_{np} в поверхностном токе \vec{i}_s определяется реальным загрязнением межламельного промежутка при эксплуатации МПТ, лежит в широких пределах $10^2 \dots 10^6$ Ом/м и регулироваться нами не может. Можно ли уменьшить емкостную составляющую полного тока. Ответить на этот вопрос важно, потому что расчеты показали – емкостная составляющая в большинстве случаев реальной эксплуатации МПТ значительно больше составляющей тока проводимости.

Рассмотрим распределение электрического поля в кусочно-однородных идеальных диэлектрических средах с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости ϵ_i . На рис. 3 показан многослойный диэлектрик, заключенный между электродами А и В. Границы раздела диэлектриков со значениями ϵ_1 и ϵ_2 нормальны к линиям напряженности внешнего электрического поля $E_{внешн}$.



Рис. 3 – Многослойный диэлектрик, заключенный между электродами А и В.

Система уравнений Максвелла для идеальных диэлектрических сред дает ряд следующих соотношений для кусочно- однородной среды.

$$\oint \vec{D} ds = 0; \int_0^{\varepsilon_1} \vec{D} ds + \int_0^{\varepsilon_2} \vec{D} ds = -D_1 + D_2 = 0; \quad (8)$$

$$\vec{D}_1 = \vec{D}_2; \vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \vec{E}_1 = \vec{D}_1 / \varepsilon_1; \vec{E}_2 = \vec{D}_2 / \varepsilon_2;$$

Для показанной на рис.3 области можно записать выражение потенциалов на границах раздела в абсолютных величинах в соответствии с (8)

$$|(\theta_A - \theta_1)| + |(\theta_1 - \theta_2)| + \dots + |(\theta_{n-1} - \theta_n)| + |(\theta_n - \theta_B)| = |(\theta_A^* - \theta_B^*)| \quad (9)$$

или в общем виде:

$$\sum_{i=1}^n |(\theta_i - \theta_{i+1})| = |(\theta_A^* - \theta_B^*)| \quad (10)$$

Нами было высказано предположение, что при определенных значениях ε_1 , ε_2 и размерах слоев диэлектриков математически должно выполняться соотношение:

$$|(\theta_A^* - \theta_B^*)| > |(\theta_A - \theta_B)| \quad (11)$$

Физически условие (11) невыполнимо, потенциалы на смежных коллекторных пластинах не могут изменяться из-за состава межламельной изоляции и всегда должно выполняться соотношение:

$$|(\theta_A^* - \theta_B^*)| = |(\theta_A - \theta_B)|, \quad (12)$$

что математически обеспечивается условием:

$$|\theta_1| < |\theta_A| < |\theta_B| \quad (13)$$

Физически условие (13) соответствует изменению направления вектора напряженности электрического поля на поверхности межламельной изоляции в интервале между электродами А и В.

Предложена конструкция коллектора МПТ, показанная на рис. 4.

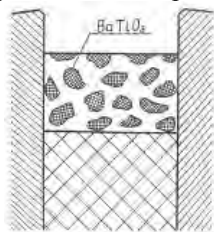


Рис. 4 – Конструкция коллектора МПТ

Миканитовая межламельная изоляция фрезеруется (продораживается) на несколько большую глубину, чем обычная изоляция (на глубину 2...2,5 мм). Продороженный объем заполняется смесью поликристаллического порошка титаната бария BaTiO₃ и связующего, обеспечивающего достаточные механическую и адгезионную прочности. Для определения оптимального процентного содержания и геометрических размеров включений BaTiO₃ в поверхностном слое изоляции были проведены расчеты электрического поля в этой области, некоторые результаты которых показаны на рис.5. Относительная диэлектрическая проницаемость BaTiO₃ принята постоянной и не зависящей от напряженности электрического поля, а размеры зерен BaTiO₃ приняты прямоугольными и одинаковыми. В целом кусочно-однородная среда считается, как идеально диэлектрическая, то есть для расчетной области решается классическое уравнение Лапласа. Зная распределение электрического поля в объеме кусочно-однородной среды, (в частности, на поверхности межламельной изоляции) мы можем рассчитать полный поверхностный ток $|\vec{I}'_s|$ аналогично.

Увеличение электрической прочности П коллектора рассчитывается как:

$$П = (|\vec{I}'_s - \vec{I}_s| / \vec{I}_s) \cdot 100 \% \quad (14)$$

Увеличение электрической прочности П коллектора в широком диапазоне расчетных параметров оставалось практически постоянным и находилось в пределах 29...31%. Так как расчеты проводились при достаточно идеализированных условиях, очевидна необходимость экспериментальной проверки теоретически полученного эффекта увеличения электрической прочности коллектора МПТ, что будет представлено во второй части работы.

Выводы. Основным выводом данной части работы является то, что теоретически показана возможность увеличения электрической прочности коллектора без изменения электромагнитных и геометрических параметров МПТ.

Список литературы: 1. Мантров М. И. Электрические разряды на поверхности диэлектрика / М. И. Мантров // Электричество. – 1940. – № 9. – С. 23-27. 2. Иоффе А. Б. Потенциальные условия на коллекторе высоковольтных тяговых электродвигателей и пути их облегчения / А. Б. Иоффе // Электричество. – 1954. – № 1. – С. 12-18. 3. Рабешко А. С. Экспериментальное исследование кругового огня на тяговом некомпенсированном электродвигателе / А. С. Рабешко, В. Я. Элснис, Б. Г. Хануков // Электромашиностроение и электрооборудование. – 1979. – № 29. – С. 78-81. 4. Саенко Н. Л. Возникновение кругового огня по коллектору тягового электродвигателя / Н. Л. Саенко // Электротехническая промышленность. Сер.: Тяговое и подъемно-транспортное

электрооборудование. – 1976. – № 1. – С. 16-18. 5. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / Н. П. Ермолин. – М. : Энергоиздат, 1951. – 336 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2013

УДК 621.315

Повышение электрической прочности коллектора МПТ / С. Г. Ломов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 84–91. – Бібліогр.: 5 назв.

Теоретично показана можливість збільшення електричної міцності колектора машин постійного струму за рахунок використання в поверхневому шарі міжлAMEЛЬНОЇ ізоляції композиційного діелектричного матеріалу із різними значеннями діелектричної проникності.

Ключові слова: ізоляція, колектор машин постійного струму.

Possibility of incensement electric strength of electric machine electric insulation is shown.

Keywords: insulation, collector of electric machine

УДК 644.11:УДК 728.1

Л.І.ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»
І.Ю.КОЗЛОВА, студент НТУ «ХПІ»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСУ НТУ «ХПІ»

У статті проаналізовано засоби підвищення якості теплопостачання спорткомплексу НТУ «ХПІ» і класу енергетичної ефективності його будівлі. Оцінено економічна та екологічна ефективність запропонованих засобів.

Ключові слова: теплопостачання, клас енергетичної ефективності, підвищення ефективності.

Вступ. Першим кроком до забезпечення енергетичної ефективності в Україні є енергетична паспортизація будівель, яка оцінює об'єми споживаної об'єктом енергії (електроенергії, опалення, гарячого і холодного водопостачання, каналізації). Ефективне використання енергозберігаючих технологій є актуальним для України, оскільки це дозволить значно зменшити споживання первинних енергоресурсів.

Об'єктом дослідження в даній роботі є спортивний комплекс НТУ «ХПІ», який являє собою окремо розташовану триповерхову споруду, побудовану з білої силікатної цегли. Спорткомплекс має легкоатлетичний манеж, 14 спортивних залів, два басейни. Також є конференц-зал, навчальні аудиторії, зал для занять спеціальної медичної групи. Особливістю даного об'єкта з точки зору проектування системи теплопостачання є підтримка різних температурних режимів у об'ємно-планувальних елементах споруди.

Метою даної роботи є аналіз деяких засобів підвищення енергетичної ефективності спорткомплексу НТУ «ХПІ».

Розрахунок індивідуального теплового пункту для теплопостачання спорткомплексу НТУ «ХПІ»

Системи опалення будівлі і гарячого водопостачання підключені до системи централізованого теплопостачання (ЦТП). Плавальні басейни обладнані системами водообміну рециркуляційного типу, підігрів води здійснюється в опалювальний період за допомогою централізованої системи опалювання. в літні місяці - електричними установками.

Фактичне теплоспоживання спорткомплексу за 2012 рік, за наданими даними, склало 1,914 млн. кВт·год на опалення та 329,7 тис кВт·год на гаряче водопостачання. Проектні річні витрати теплової

© Л. І. Лисенко, І. Ю. Козлова, 2013

енергії, розрахунок яких проведений відповідно до державних стандартів України [1-3], нижче фактичних і складають відповідно, 1,83 млн. кВт·год та 328 тис кВт·год. Для підвищення ефективності тепlopостачання спорткомплексу запропоновано встановити індивідуальний тепловий пункт (ІТП) з горизонтальними секційними кожухотрубними теплообмінниками і використанням систем автоматичного регулювання теплового навантаження

ІТП призначені для незалежного підключення систем будівель, що використовують тепло, до мереж централізованого тепlopостачання. Вони забезпечують значне зниження втрат тепла за рахунок використання одного гріючого середовища, а автоматичне регулювання витрати теплоносія дозволяє підтримувати оптимальну температуру в приміщенні і температуру гарячого водопостачання, в залежності від температури навколишнього середовища, споживання тепла та гарячого водопостачання

Принципова схема ІТП для тепlopостачання спорткомплексу та його елементи зображені на рис. 1.

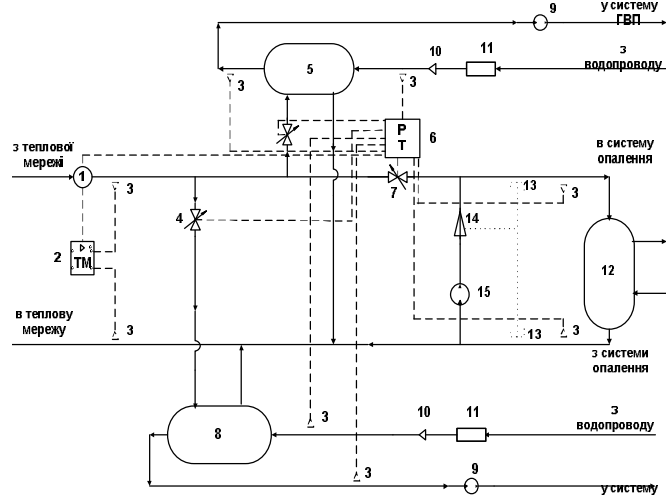


Рис. 1 – Принципова схема ІТП спорткомплексу НТУ «ХПІ»: 1 – датчик витрати води; 2 – тепловий лічильник; 3 – датчик температури; 4 – регулюючий клапан з електроприводом; 5 – теплообмінник ГВП; 6 – регулятор подачі теплоти на опалення, гаряче водопостачання, підігрів води у басейні та обмеження максимальної витрати мережної води на введення; 7 – регулюючий клапан з електроприводом; 8 – теплообмінник для підігріву води у басейну; 9 – підвищувально-циркуляційний насос гарячого водопостачання; 10 – зворотний клапан; 11 – водомір для холодної води; 12 – теплообмінник для системи опалення; 13 – датчик тиску води в трубопроводі; 14 – регулятор перепаду тисків (прямої дії); 15 – коригувальний підмішуючий насос

Система опалення повинна приєднуватися до двотрубних водяних теплових мереж по незалежній схемі. Схема приєднання теплообмінників гарячого водопостачання в закритих системах тепlopостачання вибирається залежно від співвідношення витрат теплоти на гаряче водопостачання $Q_{г.в}^{рік}$ і витрат теплоти на опалення $Q_{рік}$. Якщо $Q_{г.в}^{рік} / Q_{рік} \leq 1$, то застосовується одноступенева схема.

Розрахункові потужності систем опалення і гарячого водопостачання спорткомплексу та підігріву води в басейнах становлять, відповідно, 180 кВт, 37,5 кВт та 2144 кВт.

Для обраної схеми ІТП з горизонтальними секційними кожухотрубними теплообмінниками визначені параметри теплообмінників, приєднаних за одноступеневою схемою, та проведений тепловий і гідравлічний розрахунок горизонтальних секційних кожухотрубних водо-водяних теплообмінників. Розрахунки зроблені згідно [4-5].

Основні розрахункові параметри та результати розрахунку теплообмінників ІТП для систем опалення, гарячого водопостачання та підігріву води в басейні наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні результати розрахунку теплообмінників для ІТП

Параметр	Значення		
	Опалення	ГВП	Басейн
Розрахункові теплові витрати Q , Вт	180278,96	37504,2	2143750
Температура води, що нагрівається, на вході в теплообмінник t_1 , °C	5		
Температура води, що нагрівається, на виході з теплообмінника t_2 , °C	70	55	26
Температура гріючої води на вході в теплообмінник t_3 , °C	150		
Температура гріючої води на виході з теплообмінника t_4 , °C	40	30	15
Розрахункові витрати гріючої води G_{dh} , кг/сек	0,37009	0,14883	3,78086
Розрахункові витрати води, що нагрівається, G_h , кг/сек	0,68324	0,35718	24,30556
Фактичні швидкості води в трубах теплообмінника $W_{тр}$, м/с	0,18367	0,07386	0,84985
Фактичні швидкості води в міжтрубному просторі теплообмінника $W_{мтр}$, м/с	0,15952	0,06415	0,57812
Необхідна поверхня нагріву F , м ²	4,20538	3,26739	19,18339
Поверхня нагріву однієї секції $f_{сек}$, м ²	0,75	0,75	1,88
Число секцій в одному потоці N , шт	3	2	5

Підвищення класу енергетичної ефективності. Розрахункове значення питомих тепловитрат на опалення існуючої будівлі спорткомплексу, яке визначено відповідно до вимог державних норм і стандартів [1-3], складає

39 кВт·год/м³, що відповідає класу енергетичної ефективності «D», тоді як допустиме значення питомих тепловитрат на опалення спортивних споруд повинно становити 33 кВт·год/м³, тобто відповідати класу енергетичної ефективності «C».

Найпоширенішим методом підвищення енергетичної ефективності будівель є термомодернізація шляхом утеплення огорожувальних конструкцій будівель. У роботі розглянуто три види теплоізоляційних будівельних матеріалів для утеплення непрозорих огорожувальних конструкцій споруди спорткомплексу, а саме: серед виробів з природної органічної та неорганічної сировини – піноскло, серед волокнистих матеріалів – плити з мінеральної вати на синтетичному зв'язуючому гофрованої структури, серед полімерних матеріалів – плити пінополістирольні.

На рис. 2 зображені теплові витрати до утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій теплоізолюючими матеріалами та після термомодернізації.

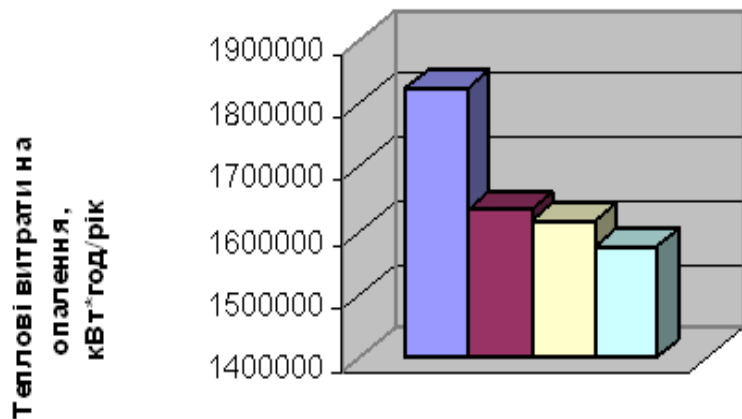


Рис. 2 – Теплові витрати на опалення до та після утеплення теплоізолюючими матеріалами: 1 – без утеплення, 2 – утеплення піносклом, 3 – утеплення плитами з мінеральної вати, 4 – утеплення плитами з пінополістиролом

Економія теплової енергії на опалення будівлі $\Delta Q_{\text{рік}}$ після її утеплення матеріалами, що розглядаються, протягом опалювального періоду склала, відповідно, 195,233, 209,731 та 249,949 тис.кВт·год.

Результати розрахунків показують, що найбільш ефективними при утепленні будівлі є пінополістирольні плити, при цьому зниження річних витрат теплової енергії на опалення досягне 18,3 %, тобто 0,33 млн. кВт·год. Відповідно, розрахункове значення питомих тепловитрат на опалення будівлі спорткомплексу складе 33,8 кВт·год/м³, що дозволить підвищити клас енергетичної ефективності спорткомплексу НТУ «ХПІ» до класу «C» (табл. 2).

Таблиця 2 – Розрахункові теплові витрати на опалення спортивного комплексу до та після утеплення будівлі пінополістирольними плитами

Параметри	Існуюча будівля	Будівля з утепленням
Загальні тепловтрати будинку через огорожувальну оболонку, $Q_{\text{к}}$, кВт·год	1785204,75	1564010,84
Побутові теплові надходження протягом опалювального періоду, $Q_{\text{вн.п}}$, кВт·год	369541,92	369541,92
Теплові надходження через вікна від сонячної радіації протягом опалювального періоду, $Q_{\text{с}}$, кВт·год	46583,08	46583,08
Витрати теплової енергії на опалення будинку протягом опалювального періоду, $Q_{\text{рік}}$, кВт·год	1829193	1579244
Розрахункове значення питомих тепловитрат за опалювальний період $q_{\text{буд}}$, кВт·год/м ³	39	33,8
Максимально допустиме значення питомих тепловитрат на опалення будівлі за опалювальний період, E_{max} , кВт·год/м ³ , що встановлюється згідно з [1]	33	
Клас енергетичної ефективності будівлі, $\left[\frac{(q_{\text{буд}} - E_{\text{max}})}{E_{\text{max}}} \right] \cdot 100\%$	+19 Клас D	+2,44 Клас C

У роботі також був проведений аналіз запропонованої системи теплопостачання за критеріями економічної та екологічної ефективності енергозберігаючих заходів (з обліком дисконтування та нарощення).

Для оцінки економічної ефективності інвестицій в енергозберігаючі заходи були визначені такі критерії економічної ефективності (з урахуванням дисконтування та нарощення), як термін окупності інвестицій; чистий дохід за рахунок економії енергоресурсів за весь період експлуатації енергозберігаючих заходів; індекс прибутковості інвестицій (відношення повного доходу до величини інвестицій, що характеризує відносну віддачу інвестиційного проекту на вкладені кошти).

Питома витрата теплової енергії на опалення спорткомплексу становить 111 кВт·год/м². Перехід на ІТП призводить до зниження тепловитрат на 15% [6]. Таким чином, питома витрата теплової енергії на опалення будівлі після установки ІТП буде становити 94,23 кВт·год/м². Зниження витрат теплової енергії у вартісному вираженні, тобто середній додатковий дохід за рахунок економії енергоресурсів, становить 0,010726 тис. грн./м².

Підібраний ІТП виготовляється компанією «Харківенергосервіс». За індивідуальним замовленням він може бути укомплектований витратомірними пристроями і, таким чином, буде сформовано повноцінний вузол обліку теплової енергії, що споживається та відпускається.

Орієнтовна вартість ІТП для системи тепlopостачання спортивного комплексу НТУ «ХПІ» з урахуванням монтажу становить 52,272 тис. грн., звідси величина інвестицій, віднесених до 1 м² площі, становить 0,003038 тис. грн./м².

Критерії економічної ефективності зміни схеми централізованого тепlopостачання, пов'язаної з впровадженням ІТП, наведено в табл. 3. Розрахунки проведені з урахуванням діючих тарифів на теплову енергію [7].

Таблиця 3 – Критерії економічної ефективності встановлення ІТП

Параметр та його одиниця вимірювання	Значення
Термін експлуатації $T_{\text{ел}}$, роки	20
Значення норми дисконту r	0,10 (10%)
Дохід за рахунок економії енергоресурсів ΔD , грн./м ²	10726
Величина капіталовкладень ΔK , грн./м ²	3038
Повний дисконтований дохід $DD_{\text{Тел}}$, грн./м ²	91317
Повний дохід при нарощенні $ND_{\text{Тел}}$, грн./м ²	614335
Чистий дисконтований дохід $ЧДД$, грн./м ²	88279
Чистий дохід при нарощенні $ЧНД$, грн./м ²	611297
Бездисконтний термін окупності T_o , роки	0,28 (\approx 3 міс.)
Термін окупності з урахуванням дисконтування T_d , роки	0,3 (\approx 4 міс.)
Термін окупності інвестицій при нарощенні T_n , роки	0,29 (\approx 3 міс.)
Індекс прибутковості інвестицій за умови дисконтування $ІД_d$	30,05466
Індекс прибутковості інвестицій за умови нарощення $ІД_n$	202,1927

Виходячи з розрахункових витрат теплової енергії на опалення будинку протягом опалювального періоду та на гаряче водопостачання спорткомплексу НТУ «ХПІ» протягом року, було визначено

споживання палива відповідно розрахунковим тепловим витратам на систему тепlopостачання. При спалюванні природного газу для виробництва теплової енергії відбувається викид близько 0,45 кг CO₂ на кожен 1 кВт·год енергії [8]. Порівняння викидів CO₂ в атмосферу при застосуванні ІТП зображені на рис. 3.

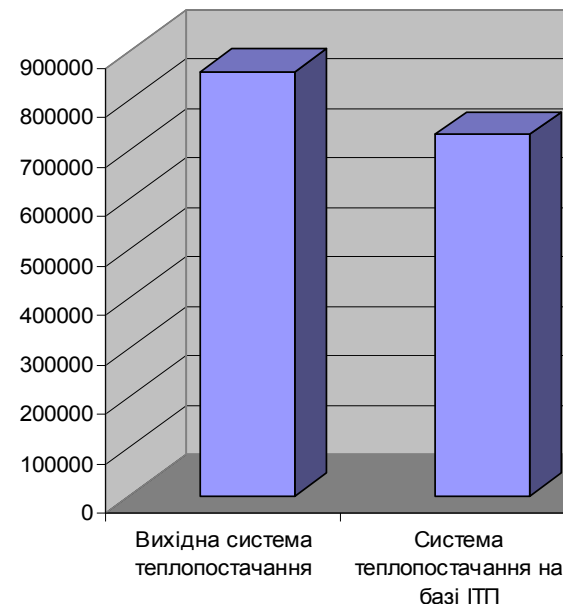


Рис. 3 – Зниження викидів CO₂, кг, при встановленні ІТП у порівнянні з існуючою системою ЦТП

У табл. 4 наведено порівняння систем тепlopостачання за витратами палива та викидами CO₂ в атмосферу з урахуванням характеристик природного (магістрального) газу відповідно [9].

Таблиця 4 – Порівняння систем тепlopостачання спорткомплексу за витратами палива та викидами CO₂

Параметр	Існуюча система	ІТП
Споживання природного газу, тис. м ³	244,6	207,9
Споживання палива, т у.п.	278	236
Викиди CO ₂ , т	858,5	729,73

Висновки. Розробка та впровадження енергозберігаючих заходів на основі застосування енергоефективних технологій дозволяє не тільки задовольнити потреби споживачів, енергопостачання яких здійснюється від централізованої системи, але й значно зменшити споживання первинних енергоресурсів, знижуючи згубний вплив на навколишнє середовище. Встановлення ІТП в систему тепlopостачання спорткомплексу НТУ «ХПІ» є ефективним засобом енергозбереження, забезпечуючи економію до 42 т.у.п і 129 т CO₂-екв на рік. При цьому бездисконтний термін окупності ІТП оцінюється в 3 міс, що свідчить об економічній привабливості цього проекту. Додаткова термомодернізація будівлі призведе до підвищення класу енергетичної ефективності до нормативного значення.

Список літератури: 1. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель». 2. ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції». 3. ДСТУ НБВ.1.1-27: 2010 «Будівельна кліматологія». 4 Свод правил по проектированию и строительству «Проектирование тепловых пунктов» к СНиП 2.04.07-86 «Тепловые сети». 5. ГОСТ 27590-2005 «Подогреватели кожухотрубные водо-водяные систем теплоснабжения». 6. *Н.В. Шилкин Экономические аспекты внедрения индивидуальных тепловых пунктов / Н.В. Шилкин // Энергосбережение/ - 2007/ - №3. - 80 с.* 7. Постанова Національної комісії регулювання ринку комунальних послуг України № 140 від 30 вересня 2011 р. «Про встановлення тарифів на теплову енергію для КП «Харківські теплові мережі». 8. Снижение выбросов CO₂ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.atmosfera.msk.ru/solar-co2>. 9. Природный (магистральный) газ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.transservis-m.ru/cifry/>.

*Надійшла до редколегії
30.09.2013*

УДК 644.11:УДК 728.1

Підвищення ефективності тепlopостачання спортивного комплексу НТУ «ХПІ» / І.Ю. Козлова, Л.І. Лисенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 92–100. – Бібліогр.: 9 назв.

В статье проанализированы способы повышения качества теплоснабжения спорткомплекса НТУ «ХПІ» и класса энергетической эффективности здания спорткомплекса. Выполнена оценка экономической и экологической эффективности предлагаемых мер.

Ключевые слова: теплоснабжение, класс энергетической эффективности, повышение эффективности.

The paper presents ways of increasing heating quality and energy efficiency class for the National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute” Sports Centre. Economic and ecological efficiency of the introduced measures is estimated.

Keywords: heating, energy efficiency class, efficiency improvement.

Л. І. ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»
К. В. МАХОТИЛО, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ «ХПІ»
Д. М. КОСАТИЙ, ТОВ «Буренерго»

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Проаналізовано результати експериментального дослідження впливу різних факторів на ефективність роботи сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в умовах Харківської області.

Ключові слова: сонячні колектори, фотоелектричні панелі, ефективність, фактори впливу.

Вступ. Останні три роки в Україні великими темпами здійснюється реалізація масштабних проєктів відновлюваної енергетики, що дозволило країні стати повноцінним гравцем світовому рівня в цієї сфері. Однак стосовно використання відновлювальних джерел енергії в системах малої енергетики ситуація не така райдушна. Приватного інвестора головним чином цікавить ефективність і економічність його автономної системи. У зв'язку з цим виникає актуальна проблема раціонального використання відповідного обладнання, зокрема сонячних колекторів (СК) та фотоелектричних панелей (ФЕП). Щоб отримати максимально вигідні для споживача показники вироблення енергії, необхідно знати реальні енергетичні характеристики обладнання в умовах конкретної місцевості. Метою даної роботи є визначення ступеня впливу різних факторів на ефективність вироблення енергії СК та ФЕП в умовах Харківської області.

Базою для проведення експериментальних досліджень став демонстраційно-освітній Енергопарк «Схід» ТОВ «БУРЕНЕРГО», розташований неподалік м. Харкова, в сел. Солоніцевка, Харківської області. Географічні координати енергопарку: 49°60' північної широти, 36°28' східної довготи. В роботі використані результати досліджень, виконаних в межах магістерських дипломних робіт студентів НТУ «ХПІ» Соседовой К. С. і Огарко О. В. та співробітників ТОВ «Буренерго», м. Харків.

Кліматичні умови. У табл. 1 приведені дані інтенсивності сонячної радіації [1] на півночі та півдні Харківській області за 2012

© Л. І. Лисенко, К. В. Махотило, Д. М. Косатий, 2013

рік, які зібрані і порівняні з даними Німеччини, країною, яка на сьогоднішній день є лідером за темпами впровадження сонячних систем та за їх сумарною потужністю.

Як видно з таблиці, Харківська область має аналогічний, а в деякі місяці навіть кращий, потенціал у використанні сонячних систем тепло- та електропостачання, але їх впровадження відбувається значно повільніше. Особливо це справедливо для геліосистем. Така ситуація зумовлена декількома факторами, до яких можна віднести, зокрема, відсутність чіткої законодавчої бази розвитку сонячної теплоенергетики та державної підтримки і субсидій, що не сприяє зацікавленості у потенційних інвесторів

Таблиця 1 – Рівень сонячної інсоляції, МДж/м² у 2012 році

Місцевість, пн.ш.	Місяць року											
	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Вовчанськ, 50°17'	2,94	8,44	11,39	14,94	21,32	22,76	23,87	18,07	14,42	7,26	3,51	2,14
Лозова, 48°53'	3,55	9,20	11,34	16,25	20,63	24,04	24,61	19,26	14,95	8,83	4,42	2,72
Німеччина, 50°	2,95	6,10	11,23	14,05	19,57	15,89	18,31	18,10	12,87	7,30	3,03	2,09

Дослідження ефективності геліоколекторів. Для оцінки ефективності використання геліосистем були використані пласкі та вакуумні СК Vaillant auroTHERM VFK 145 V і VTK 1140/2, відповідно, (див. табл. 2) [2]. Розрахунок вироблення теплової енергії геліосистемою з двох пласких і з двох вакуумних СК проводився для середньодобової максимальної і середньої сонячної радіації з березня по жовтень [1]. Для кожного з цих місяців був визначений оптимальний кут нахилу (аналіз проводився в діапазоні кутів 30-50°).

Таблиця 2 – Технічні характеристики СК Vaillant auroTHERM

Характеристика	Значення	
	VFK 145 V	VTK 1140/2
Абсорбуюча поверхня, м ²	2,35	2
ККД згідно EN 12975, %	80,1	64,2
Коефіцієнт поглинання абсорбера α , %	94	93,5
Пропускна здатність скла τ , %	91	85
Термічний опір поверхні СК, м ² К/Вт	0,13	0,13

За результатами розрахунку і збору фактичних даних отримано співвідношення теоретичного і реального вироблення теплової енергії геліосистемою. На рис. 1 показано результати розрахунків для линія. Як видно з рисунку, в період з низькою інтенсивністю (високою хмарністю) розрахункові і фактичні значення майже не відрізняються, а в усі інші дні спостерігається значне (в 2-3 рази) відхилення реального вироблення теплової енергії від розрахунку. Для визначення причин розходження розрахункових і фактичних значень були проаналізовані фактори, які могли вплинути на відхилення реального вироблення теплової енергії від розрахункового.

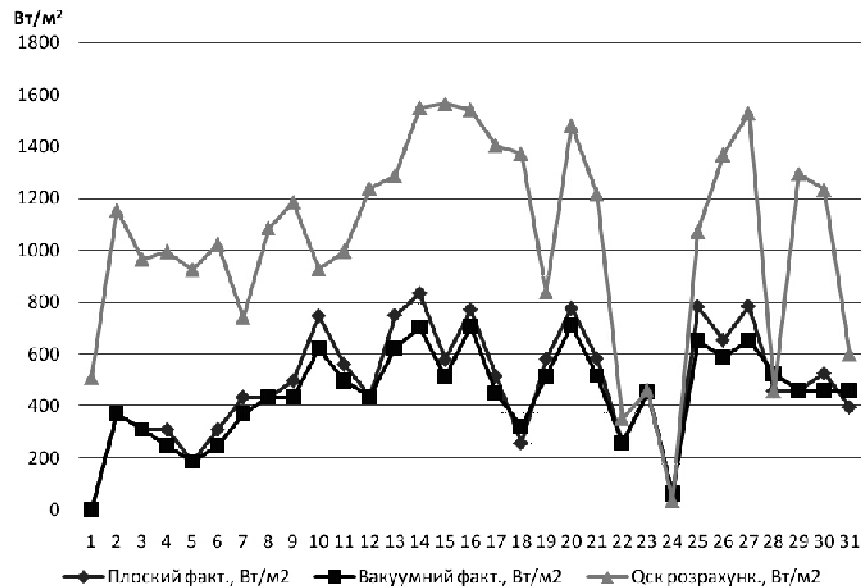


Рис. 1 – Розрахункове і фактичне середньоденне вироблення тепла СК

Ефективність СК залежить від метеоумов місцевості, прозорості скла, кута нахилу колектора, способу установки, часу використання (протягом усього року або сезонно), обслуговування та ін. В роботі досліджено, як саме зміниться вироблення теплової енергії в залежності від значень деяких з цих показників.

Для визначення залежності ККД від цих факторів використано рівняння теплового балансу: в будь-який момент часу кількість сонячної радіації, що поглинається поверхнею абсорбера СК $Q_{\text{пов}}$, дорівнює сумі корисної теплоти для нагріву води $Q_{\text{СК}}$, теплоти, яка

витрачається на нагрів самого СК, $Q_{\text{НАГР}}$, і тепловтрат в навколишнє середовище $Q_{\text{ВТР}}$. З моменту стабілізації температури і надходження сонячної радіації теплою $Q_{\text{НАГР}}$ можна знехтувати, тобто

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{ВТР}}. \quad (1)$$

ККД СК визначається як відношення корисної теплоти $Q_{\text{СК}}$ до кількості сонячної радіації, поглиненої поверхнею абсорбера $Q_{\text{пов}}$.

Корисну теплоту для нагріву води $Q_{\text{СК}}$, Вт, представляємо у вигляді, Вт:

$$Q_{\text{СК}} = A[\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I - (T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}], \quad (2)$$

де A – площа освітлюваної поверхні колектора (площа нетто), м^2 ; $\tau_{\text{пов}}$ – коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання прозорим покриттям; $\alpha_{\text{П}}$ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання приймальною поверхнею колектора; I – сумарна інтенсивність потоку сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $T_{\text{П}}$ – температура приймальної поверхні СК, К; $T_{\text{НС}}$ – температура навколишнього повітря, К; $R_{\text{П}}$ – термічний опір приймальної поверхні СК.

Годинна кількість тепла, поглинена абсорбером СК, Вт, розраховується як:

$$Q_{\text{пов}} = \tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}AI. \quad (3)$$

Зворотній тепловий потік в навколишнє середовище за рахунок підвищення температури поверхні СК у процесі поглинання енергії дорівнює, Вт:

$$Q_{\text{ВТР}} = A(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}, \quad (4)$$

де $T_{\text{НС}}$ – температура навколишнього повітря, К.

Температура приймальної поверхні СК розраховується за формулою:

$$T_{\text{П}} = (T_{\text{НС}} + T_{\text{Б}})/2, \quad (5)$$

де $T_{\text{Б}}$ – температура води в буферній ємності.

Остаточно залежність ККД СК від факторів впливу визначається як

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{ВТР}}}{Q_{\text{пов}}} = 1 - \frac{A(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}}{A\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I} = 1 - \frac{(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}}{\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I}. \quad (6)$$

Чистота поверхні СК безпосередньо впливає на продуктивність будь-якої геліосистеми і збільшення забруднення скла (частки пилу, опале листя тощо) призводить до зменшення ефективності роботи СК. На рис. 2 наведено залежність ККД від прозорості скла $\tau_{\text{пов}}$ плоского колектора VFK 145 V.

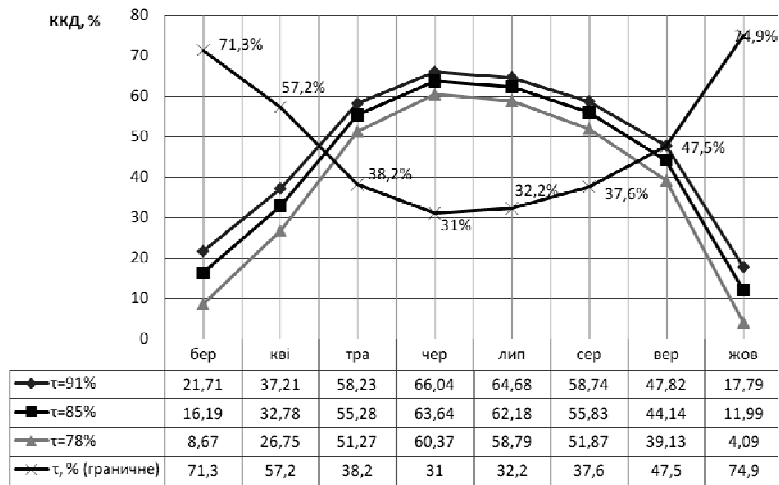


Рис. 2 – Залежність ККД від рівня прозорості скла СК

Як видно, ККД значно знижується при зменшенні τ від 91 % до 78 % (табл. 3)

Таблиця 3 – Зменшення ККД, %, СК VFK 145 V при зменшенні прозорості скла τ на 15%

Місяць	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов
Δ ККД, %	60	29	12	9	10	12	19	77

Розрахункове граничне значення прозорості $\tau_{\text{ГРАН}}$, при якому ККД = 0, змінюється від 31 % в червні до 74,9 % в жовтні, що свідчить про більшу значущість цього фактора. Отже, чим нижча інтенсивність сонячної радіації, тим більша вимога до чистоти скла і відсутності затінення СК.

На рис. 3-4 наведено залежність ККД від температури навколишнього середовища $T_{\text{НС}}$. Для аналізу відібрано дані про фактичне вироблення теплової енергії СК з березня по жовтень для доби з середньою і максимальною середньою інтенсивністю сонячної радіації.

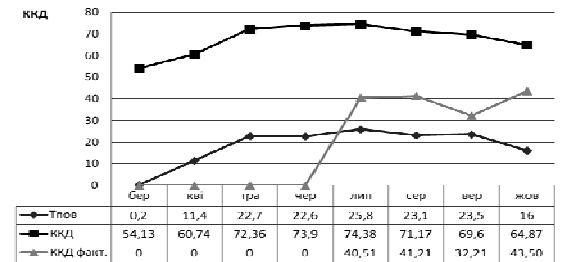


Рис. 3 – Залежність ККД від температури повітря в день з максимальною добовою інтенсивністю сонячної радіації

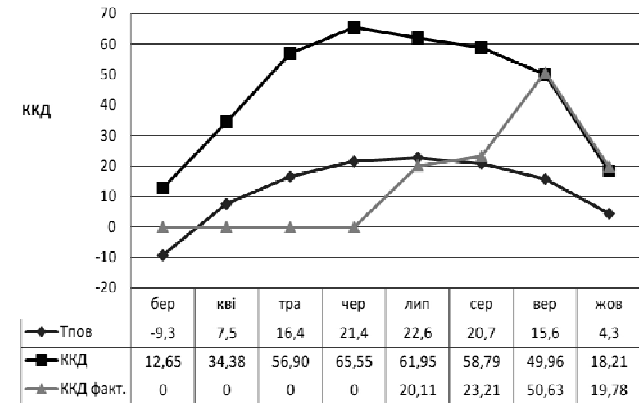


Рис. 4 – Залежність ККД від температури повітря в день з середньою добовою інтенсивністю сонячної радіації

Як видно, незважаючи на зміну частки розсіяної радіації і зміну коефіцієнта прямої радіації по місяцям, залежність ККД від $T_{\text{НС}}$ є прямопропорційною. При високих температурах зовнішнього повітря в дні з максимальною інтенсивністю сонячної радіації ККД значно знижується, а у вересні-жовтні, коли і $T_{\text{НС}}$, і I менше, розрахункові і фактичні дані співпадають (див. рис.4). Таким чином, нагрів скла СК, обумовлений високою температурою і високою інтенсивністю сонячної радіації, яка додатково підвищує температуру скла, значно знижує ККД за рахунок збільшення втрат в навколишнє середовище.

На рис. 5 наведено результати дослідження впливу оптимального кута нахилу β СК на інтенсивність сонячної радіації, яка падає на його поверхню. В розрахунках використано дані про фактичну сонячну радіацію на горизонтальній поверхні з березня по жовтень 2011-2012 років [1].

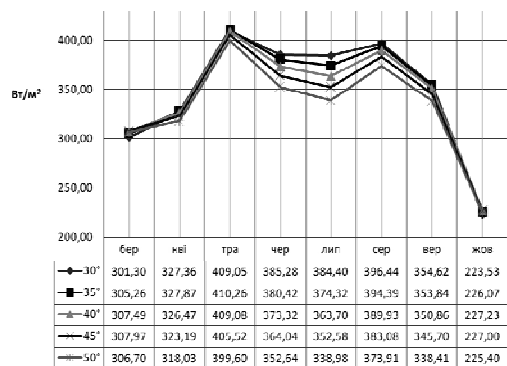


Рис.5 – Залежність інтенсивності сонячної радіації на поверхні СК від кута нахилу β

З графіків видно, що чим більша інтенсивність сонячного випромінювання, тим важливіше вимога до кута нахилу СК. При відносно низькому рівні сонячної радіації оптимальний кут нахилу колектора знаходиться в інтервалі 30-50°, тобто цей фактор не здійснює помітного впливу на ефективність роботи СК (наприклад, в жовтні зміна I в залежності від β складає 1,6 %). В літні місяці, коли рівень сонячної радіації зростає майже вдвічі, оптимальний кут нахилу СК стає досить значним фактором. При цьому зменшення інтенсивності сонячної радіації на поверхні СК при відхиленні від оптимального значення кута нахилу сягає 12 %. Результати розрахунків показують, що для умов Харківської області оптимальним кутом нахилу сонячного колектору є 30°.

Підсумовуючи, можна відмітити, що в літні місяці на ефективність СК впливає як температура навколишнього середовища, так і прозорість скла й кут нахилу СК, а в осінні й весняні – переважно прозорість скла СК.

Враховуючі, що дослідні СК встановлені під оптимальним кутом нахилу 30°, фактор кута практично не впливає на їх ефективність. Тому виявлене розходження фактичного та розрахункового вироблення тепла в літні місяці (див. рис. 1) визначається перш за все недостатнім очищенням поверхні скла СК і підвищеними втратами тепла через його високу температуру.

Дослідження ефективності фотоелектричних панелей. Достатньо великий середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні, і в Харківській області, зокрема (див. табл. 1), дозволяє розраховувати на високу ефективність використання ФЕП для вироблення електроенергії. Проте, як і у

випадку СК, крім інтенсивності сонячного випромінювання на продуктивність ФЕП впливає низка факторів, пов'язаних з її розташуванням: орієнтація на сторони світу, кут нахилу та затінення. В даній роботі вплив цих факторів був експериментально досліджений на прикладі ФЕП з монокристалічного кремнію. Панелі цього типу відрізняються найбільшим ККД, але й найбільш залежні від умов роботи. Технічні характеристики дослідної ФЕП наведені в табл. 4. Фактори впливу розглядалися, перш за все, з точки зору ефективності малих дахових фотоелектричних систем потужністю до 1-3 кВт. Дослідження виконувались в осінній період.

Таблиця 4 – Технічні характеристики дослідної ФЕП з монокристалічного кремнію

Потужність в стандартних умовах, Вт	80
Номинальна напруга, В	30
Номинальний струм, А	2,8
Розміри вхщ, ммхмм	1580х808
Розташування комірок	9х4

Найбільшу кількість енергії від ФЕП можна отримати, коли її поверхня перпендикулярна сонячним променям. Проте кут підйому Сонця змінюється на протязі доби та року. В Україні для орієнтованої на південь ФЕП оптимальний для усього року кут нахилу к горизонту знаходить в діапазоні 32°–34°. Але при використанні найбільш дешевого способу монтажу ФЕП: безпосередньо на даху будинку, забезпечення цього кута нахилу не завжди можливе.

На рис. 6 наведено результати оцінки потужності орієнтованої на південь дослідної ФЕП в середині доби при різних кутах нахилу. Як видно, відхилення від оптимального кута на 15° зменшує потужність на 20 %, а відхилення на 30° – до 45 %. Це вдвічі більше, ніж теоретична зміна обсягу інсоляції на похилій поверхні.

При закріпленні ФЕП на даху будинку неоптимальним може бути не лише кут нахилу, але й її азимут. Теоретично, навіть при північній орієнтації, вдень на поверхню ФЕП у вигляді розсіяного світла потрапляє до 50 % від загальної інсоляції. Проте, через нездатність монокристалічних комірок виробляти електрику у розсіяному світлі ця енергія не використовується. Підчас експериментів було з'ясовано, що при повороті ФЕП на 90° вліво чи вправо від півдня фактичне вироблення електроенергії падає до нуля.

Ще одним важливим чинником, що впливає на ефективність ФЕП, є затінення. ФЕП складається з кількох груп послідовно з'єднаних комірок, і навіть при незначному затіненні однієї комірки фактично відключається вся пов'язана з нею група. Щоб зберегти працездатність ФЕП при частковому затіненні, кожна група захищається шунтуючим діодом, через який тече струм від інших груп. Таким чином, напрям, з якого відбувається затінення ФЕП, стає критично важливим фактором для її ефективності.

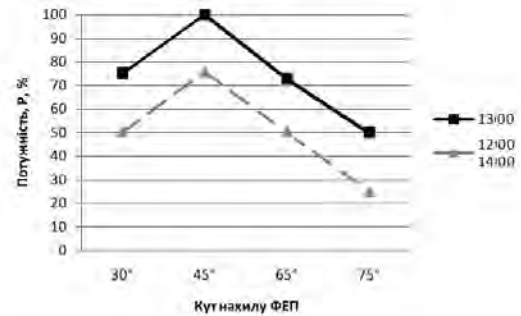


Рис. 6 – Залежність потужності ФЕП від кута нахилу

На рис. 7 представлені результати експериментального дослідження потужності ФЕП при різних варіантах затінення.

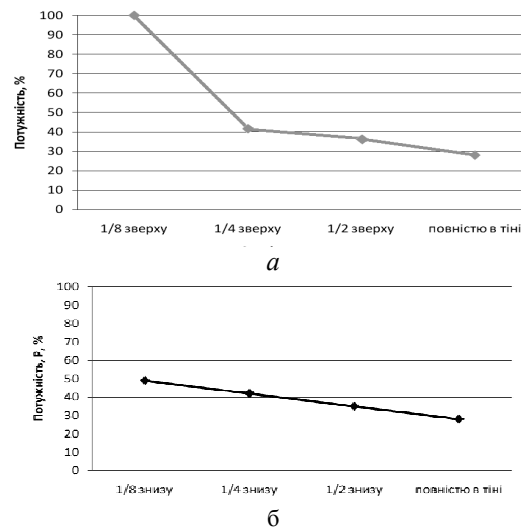


Рис 7 - Залежність потужності ФЕП від ступеня затінення: а – зверху; б – знизу

На рис. 7,а поступове затінення модуля відбувалося зверху-вниз, а рис. 7,б – в зворотному напрямку. Як видно, завдяки сприятливому місцю підключення шунтуючих діодів, затінення панелі на 1/8 зверху не дає суттєвого зниження потужності ФЕП, тобто є допустимим при встановленні ФЕП. Затінення більшої площі ФЕП призводить до різкого зниження її потужності на 60–70 %.

Якщо затінення ФЕП відбувається в протилежному напрямку, воно одразу викликає зниження потужності на 50 % і далі до 70 %, як при затіненні зверху. Цю особливість необхідно враховувати при плануванні місця розташування ФЕП на даху при неможливості уникнення часткового затінення.

Для збільшення вироблення енергії ФЕП використовуються одно- та двокоординатні системи стеження за Сонцем. Ефект від них тим більш виражений, чим північніше розташовано ФЕП. Для західної України цей показник знаходиться на рівні 20-30 %, а для центральної та східної України – 30-40 %.

На рис. 8 подано результати експериментального оцінювання ефективності однокоординатної системи стеження (по азимуту від напрямку на південь) по даним про потужність ФЕП в першій половині доби. Як видно, в умовах Харківської області однокоординатна система стеження здатна збільшити вироблення енергії на 10-20 %. Це майже вдвічі менше, ніж теоретична оцінка, але слід відмітити, що період оцінювання був обмежений лише осінню.

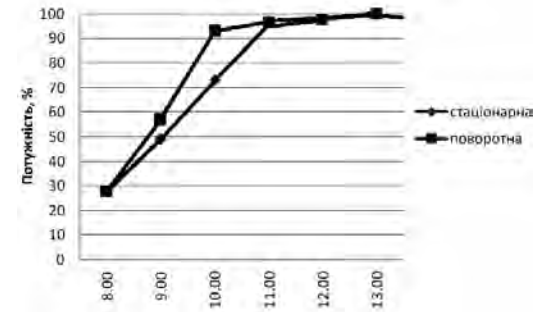


Рис 8 – Порівняння ФЕП в стаціонарному та поворотному режимах

Підсумовуючи результати проведених дослідів з ФЕП, можна заключити, що вони підтверджують значущість перерахованих факторів. Оцінки їх фактичного впливу на продуктивність ФЕП в умовах Харківської області зведені в табл.5.

Таблиця 5 – Вплив факторів на продуктивність ФЕП

Фактор	Величина, тип	Зміна потужності, %
Відхилення від оптимального кута нахилу	до 15°	до -20
	до 30°	до -40
Відхилення від півдня	± 90°	до -100
Затінення панелі	Тимчасове, незначне	від -10 до -20
	Систематичне, значне	від -50 до -60
Система стеження за Сонцем	Однокоординатна	від +10 до +20

Висновки. При проектуванні сонячних систем тепло- та електропостачання важливо забезпечити оптимальні умови роботи обладнання. Однак в реальності це не завжди можливо або призводить до подорожчання проекту. В роботі експериментально визначено залежності продуктивності СК та ФЕП від впливу факторів розміщення і погодних умов на прикладі Харківської області. Вони дозволяють оцінити реальну ефективність системи та обрати проектні рішення, оптимальні за продуктивністю і вартістю. В той же час, виявлена для більшості факторів різниця між теоретичними й експериментальними оцінками вимагає проведення подальших, більш детальних та тривалих досліджень їх впливу на продуктивність СК і ФЕП.

Список літератури: 1 – Climatology Resource for Agroclimatology Daily Averaged Data (Evaluation Version) [електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://power.larc.nasa.gov>; 2 – Махотіло К. В., Косатий Д. М. Експериментальна оцінка ефективності сонячних колекторів Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит – №12, 2012 – с. 43-48.

Надійшла до редакції 30.09.2013

УДК 644.11:УДК 728.1

Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в харківській області / Л. І. Лисенко, К. В. Махотіло, Д. М. Косатий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59(1032). – С. 96 – 105. – Бібліогр: 2 назв.

Проаналізовані результати експериментального дослідження впливу різних факторів на ефективність роботи сонячних колекторів і фотоелектричних панелей в Харківській області.

Ключевые слова: солнечный коллектор, фотоэлектрическая панель, эффективность, экспериментальная оценка.

Results of experimental studies of various influential factors action on the performance of solar collectors and photovoltaic panels in Kharkiv region are analyzed.

Key words: solar collectors, photovoltaic, efficiency, experimental evaluation.

УДК 621.316.99

И.В. НИЖЕВСКИЙ, инженер, СКБ «Электрощит», Харьков
В.И. НИЖЕВСКИЙ, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПИ»
А.А. КРУПЕНКО, студент, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА У ВЪЕЗДОВ (ВХОДОВ) И УГЛОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО КОНТУРА ПОДСТАНЦИИ

Приведены результаты исследований потенциального поля на поверхности грунта на территории подстанции и за ее пределами. Показана необходимость при проектировании ЗУ подстанций производить проверку напряжения прикосновения в заданных точках как расчетным путем, так и экспериментально после сооружения ЗУ.

Ключевые слова: исследование, потенциальное поле, грунт, подстанция, заземляющее устройство

Введение. Несмотря на значительные успехи в области ЗУ, исследования продолжают. Это связано с необходимостью дальнейшего повышения уровня электробезопасности, снижения риска отказов оборудования и развития аварий по причине несовершенства ЗУ.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [1], если заземляющее устройство (ЗУ) находится внутри внешнего ограждения электроустановки, то у входов и въездов на ее территорию необходимо выполнить выравнивание потенциалов, например, путем установки двух вертикальных заземлителей, присоединенных к внешнему горизонтальному заземлителю напротив входов и въездов. В этом случае вертикальные заземлители должны иметь длину 3–5 м, а расстояние между ними должно равняться ширине входа или въезда. Кроме того (см. ПУЭ, п. 1.7.107), прокладывают горизонтальные заземлители, которые находятся за территорией электроустановки, на глубине, не меньшей, чем 1 м, а внешний контур ЗУ в случае выхода его за пределы электроустановки рекомендовано выполнять в виде многоугольника с тупыми или закругленными углами.

В случае (см. ПУЭ, п. 1.7.110), если заземлитель любой электроустановки соединен с заземлителем электроустановки напряжением выше 1 кВ, то для выравнивания потенциалов вокруг такой электроустановки или здания, в котором она расположена, необходимо проложить в земле на глубине 1 м и на расстоянии 1 м от фундамента здания или периметра территории, занятой оборудованием, заземлитель, соединенный с системой выравнивания

© И. В. Нижевский, В. И. Нижевский, А. А. Крупенко, 2013

потенциалов на территории, а у входа и у въезда на территорию здания – проводники на расстоянии 1 м и 2 м от заземлителя на глубине 1 м и 1,5 м соответственно и соединить эти проводники с заземлителем.

Целью настоящей работы является оценка соответствия параметров электробезопасности на территории подстанции и за ее пределами требованиям действующих ПУЭ.

Метод исследования. Математическое моделирование ЗУ подстанции и расчет его электрических характеристик по методу наведенных потенциалов.

Основные результаты. Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта выполнено на примере двухуровневого ЗУ подстанции. Первый уровень представляет собой сетку из четырех одинаковых ячеек с размерами 10x10 м², а второй уровень представляет собой внешний контур первого уровня, но каждая его сторона увеличена на 2 м. Глубина укладки сетки t_1 , а глубина укладки контура второго уровня t_2 , которая варьируется в диапазоне от 0,5 м до 2,5 м. Диаметр электродов ЗУ принят равным $d=0,02$ м. Грунт, в котором расположено ЗУ, принят в виде двухслойной модели с удельным сопротивлением ρ_1 первого слоя, которое варьировалось в диапазоне от 20 Ом·м до 1000 Ом·м, и $\rho_2=100$ Ом·м второго слоя, при этом толщина первого слоя была принята равной $h_1=0,7$ м, а второго $h_2=\infty$. Расчетные точки, в которых определялся потенциал на поверхности грунта, расположены на двух направлениях. Первое направление расчетных точек проходит из центра угловой ячейки сетки через ее внешний угол, а второе направление проходит из центра угловой ячейки перпендикулярно ее внешней стороне, что соответствует въезду (входу) на территорию подстанции.

Отдельные результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 для первого направления и в табл. 2 для второго. Анализ полученных результатов позволяет утверждать следующее. Увеличение глубины укладки контура второго уровня, т.е. $t_2 > h_1$, приводит к увеличению относительного потенциала ϕ_i/ϕ_3 в любой точке на территории сетки первого уровня и снижению относительного потенциала за ее пределами в диапазоне изменения удельного сопротивления грунта ρ_1 от 20 Ом·м до 1000 Ом·м.

Если заземляющая сетка верхнего уровня и контур нижнего уровня находятся в первом слое грунта, то величина относительного потенциала ϕ_i/ϕ_3 при уменьшении ρ_1 возрастает, а при увеличении ρ_1 снижается по сравнению с однородным грунтом, т.е. в случае, когда $\rho_1 = \rho_2$. Кроме того, за пределами внешнего угла заземляющей сетки по мере удаления от нее величина относительного потенциала снижается

более существенно, чем у въезда (входа) на подстанцию. Однако наличие только заземляющей сетки приводит к еще большему снижению относительного потенциала. Увеличение глубины укладки сетки первого уровня при отношении $\rho_1/\rho_2=0,2$ приводит к снижению относительного потенциала ϕ_i/ϕ_3 на поверхности грунта как над сеткой, так и за ее пределами. В случае, если $\rho_1/\rho_2=1$ и более значение относительного потенциала в любой точке на поверхности грунта увеличивается. Увеличение относительного потенциала в произвольной точке подстанции приводит к снижению напряжения прикосновения и наоборот. Как видим, напряжение прикосновения зависит не только от места его определения на территории подстанции (а в отдельных случаях и за ее пределами), но и от времени года, причем в случае промерзания верхнего слоя грунта возможно существенное превышение допустимых его значений.

Таблица 1 – Распределение потенциалов по поверхности грунта для первого направления

ρ_1 , Ом·м	t_1 , м	t_2 , м	Величина относительного потенциала ϕ_i/ϕ_3 в расчетной точке $x=y$, м								
			15	17,5	20	20,5	21	21,5	22	23	25
			20	0,5	0,6	0,904	0,924	0,966	0,94	0,886	0,801
		1	0,894	0,909	0,918	0,851	0,789	0,729	0,679	0,602	0,499
		1,5	0,898	0,913	0,914	0,842	0,78	0,727	0,68	0,606	0,503
		2	0,902	0,917	0,912	0,838	0,778	0,727	0,683	0,611	0,509
	1	1,1	0,794	0,8	0,79	0,757	0,712	0,662	0,618	0,547	0,452
		1,5	0,797	0,8	0,776	0,74	0,697	0,654	0,614	0,548	0,456
		2	0,802	0,801	0,768	0,729	0,689	0,649	0,613	0,551	0,461
		2,5	0,806	0,803	0,762	0,724	0,684	0,647	0,613	0,554	0,465
100	0,5	0,6	0,736	0,771	0,896	0,854	0,782	0,666	0,589	0,495	0,394
		1,1	0,751	0,787	0,884	0,817	0,745	0,666	0,6	0,511	0,408
		1,5	0,762	0,797	0,875	0,798	0,729	0,663	0,605	0,52	0,417
		2	0,773	0,807	0,866	0,783	0,717	0,659	0,608	0,528	0,426
	1	1,1	0,761	0,794	0,851	0,81	0,745	0,668	0,604	0,514	0,41
		1,5	0,772	0,802	0,839	0,79	0,729	0,665	0,608	0,523	0,42
		2	0,782	0,811	0,827	0,774	0,716	0,661	0,611	0,532	0,429
		2,5	0,791	0,817	0,82	0,765	0,709	0,658	0,613	0,538	0,438
1000	0,5	0,6	0,256	0,285	0,547	0,467	0,406	0,272	0,215	0,17	0,131
		1,1	0,466	0,531	0,759	0,693	0,619	0,521	0,444	0,352	0,265
		1,5	0,485	0,55	0,744	0,659	0,521	0,518	0,453	0,366	0,277
		2	0,5	0,561	0,721	0,624	0,563	0,506	0,454	0,375	0,286

1	1,1	0,586	0,634	0,756	0,717	0,642	0,549	0,475	0,384	0,293
	1,5	0,597	0,646	0,742	0,691	0,621	0,547	0,483	0,396	0,303
	2	0,609	0,658	0,727	0,668	0,603	0,541	0,487	0,406	0,313
	2,5	0,619	0,666	0,716	0,653	0,591	0,536	0,488	0,413	0,321

Таблица 2 – Распределение потенциалов по поверхности грунта для второго направления

ρ_1 , Ом·м	t_1 , м	t_2 , м	Величина относительного потенциала φ/φ_3 в расчетной точке x , ($y=15$), м								
			15	17,5	20	20,5	21	21,5	22	23	25
20	0,5	0,6	0,904	0,916	0,971	0,968	0,952	0,918	0,877	0,805	0,692
		1	0,894	0,903	0,95	0,929	0,898	0,863	0,828	0,763	0,659
		1,5	0,898	0,907	0,95	0,927	0,894	0,861	0,828	0,766	0,664
		2	0,902	0,911	0,951	0,926	0,893	0,861	0,829	0,77	0,67
	1	1,1	0,794	0,799	0,824	0,817	0,801	0,776	0,748	0,692	0,599
		1,5	0,797	0,8	0,817	0,807	0,79	0,767	0,742	0,69	0,601
		2	0,802	0,804	0,814	0,802	0,784	0,762	0,738	0,69	0,604
		2,5	0,806	0,807	0,813	0,8	0,781	0,759	0,736	0,691	0,608
100	0,5	0,6	0,736	0,756	0,895	0,892	0,87	0,814	0,753	0,66	0,541
		1	0,749	0,769	0,895	0,881	0,849	0,805	0,756	0,672	0,555
		1,5	0,762	0,783	0,895	0,872	0,835	0,796	0,756	0,681	0,568
		2	0,773	0,793	0,894	0,866	0,827	0,79	0,755	0,687	0,579
	1	1,1	0,761	0,78	0,863	0,86	0,839	0,803	0,759	0,678	0,562
		1,5	0,772	0,79	0,86	0,852	0,828	0,795	0,757	0,685	0,572
		2	0,782	0,8	0,859	0,846	0,821	0,789	0,756	0,69	0,582
		2,5	0,791	0,807	0,858	0,843	0,816	0,786	0,755	0,694	0,591
1000	0,5	0,6	0,256	0,273	0,532	0,506	0,48	0,392	0,316	0,244	0,187
		1	0,46	0,497	0,725	0,718	0,691	0,643	0,583	0,486	0,374
		1,5	0,485	0,522	0,725	0,699	0,661	0,625	0,583	0,504	0,396
		2	0,5	0,535	0,717	0,68	0,636	0,604	0,572	0,508	0,407
	1	1,1	0,586	0,613	0,745	0,748	0,726	0,681	0,627	0,535	0,42
		1,5	0,597	0,625	0,742	0,737	0,711	0,672	0,628	0,546	0,433
		2	0,609	0,637	0,739	0,728	0,699	0,663	0,625	0,553	0,445
		2,5	0,619	0,646	0,736	0,722	0,691	0,656	0,622	0,557	0,454

Результаты исследований хорошо согласуются с результатами известных авторов [2].

Выводы. Несмотря на выполнение указаний ПУЭ, результаты выполненных исследований показывают, что в каждом конкретном

случае при проектировании ЗУ подстанций необходимо производить проверку напряжения прикосновения в заданных точках как расчетным путем, так и экспериментально после сооружения ЗУ. Это особенно важно для тех. регионов Украины, в которых верхний слой грунта промерзает ниже глубины укладки сетки, что может привести к превышению допустимой величины напряжения прикосновения. Необходимо продолжить исследования для многоуровневых заземлителей.

Список литературы: 1. Правила улаштування електроустановок. Глава 1.7 (ПУЕ). – К. : ТОВ «ТКО», 2011. - 71 с. 2. Бургсдорф В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

Поступила в редколлегию 06.10.2013

УДК 621.316.99

Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта у вьездов (входов) и углов заземляющего контура подстанции / И. В. Нижевский, В. И. Нижевский, А. А. Крупенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 112–116. – Бібліогр.: 2 назв.

Наведено результати досліджень потенційного поля на поверхні ґрунту на території підстанції та за її межами. Показано необхідність при проектуванні ЗУ підстанцій проводити перевірку напруги дотику в заданих точках як розрахунковим шляхом, так і експериментально після спорудження ЗУ.

Ключові слова: дослідження, потенційне поле, ґрунт, підстанція, заземлювальний пристрій

The results of the potential field research on the surface of the ground in the substation and beyond. The necessity of the design of the sub-stations earthing system to inspect the contact voltage at predetermined points as calculated by, and after the construction of the experimental earthing system.

Keywords: research, potential field, ground, substation, earthing system

Н.В.РУДЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

В статті розглянуто математичну модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів. Лл.:2. Бібліогр. 9 назв.

Ключові слова: математична модель, лінія електропередач

Постановка проблеми. Дослідження процесів в елементах електроенергетичної системи в різних режимах роботи є важливою науково-практичною задачею. Особливий інтерес викликають електромагнітні перехідні процеси, що постійно мають місце при роботі електричних систем. Дослідження електромагнітних перехідних процесів в несиметричних режимах при використанні математичних моделей елементів в однофазному виконанні недостатньо повно відображають усю картину процесу, при цьому доцільно використовувати трьохфазні математичні моделі в фазних координатах. З існуючим рівнем комп'ютерних технологій рішення таких задач не викликає ніяких труднощів, при цьому одразу будемо отримувати реальні значення параметрів режиму, що дозволить контролювати фізику процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Одним з основних функціональних елементів електроенергетичної системи є лінії електропередач (ЛЕП). Відомі роботи, де при формуванні математичних моделей ЛЕП використовують фазні координати для розрахунку сталого режиму [1, 2]. Для дослідження електромагнітних перехідних процесів такі моделі будуть не придатними. В такому випадку треба використовувати модель в фазних координатах з миттєвими значеннями струмів та напруг [3]. Головною особливістю ЛЕП є те, що її параметри розподілені рівномірно за всією довжиною і, як відомо, схема заміщення ділянки лінії довжиною dx має вигляд представлений на рис. 1 [4].

Різниця напруг на кінцях ділянки в матричній формі визначається [4]

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a & & \\ & R_b & \\ & & R_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{pmatrix}$$

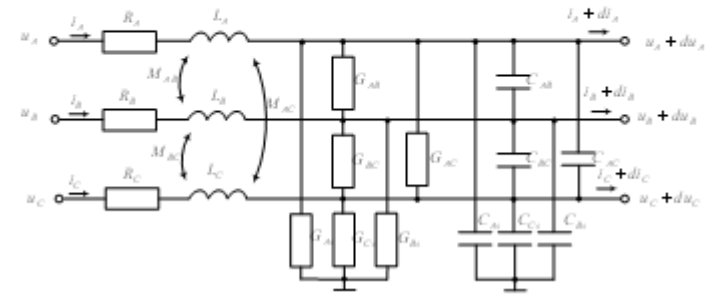


Рис.1 – Схема заміщення ділянки лінії довжиною dx

Різниця струмів на початку і в кінці ділянки в матричній формі визначається [4]

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_a + G_{ab} + G_{ac} & -G_{ab} & -G_{ac} \\ -G_{ba} & G_b + G_{ba} + G_{bc} & -G_{bc} \\ -G_{ca} & -G_{cb} & G_c + G_{ca} + G_{cb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_a + C_{ab} + C_{ac} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_b + C_{ba} + C_{bc} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_c + C_{ca} + C_{cb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

При ідеально транспонованій лінії фазні дроти ідентичні в геометричному співвідношенні, тому виконуються наступні залежності

$$\left. \begin{matrix} R_a = R_b = R_c = R \\ L_a = L_b = L_c = L \\ M_{ab} = M_{ac} = M_{cb} = M \\ C_a = C_b = C_c = C \\ C_{ab} = C_{ac} = C_{cb} = C \\ G_a = G_b = G_c = G \\ G_{ab} = G_{ac} = G_{cb} = G \end{matrix} \right\}$$

де R – активний опір ділянки лінії, що відповідає втратам активної потужності на нагрівання дротів; G, G_3 – активні провідності, що відповідають втратам на корону ділянки лінії; C, C_3 – ємності, що

відповідають електричним зарядам ділянки лінії; L , M – власна та взаємна індуктивності дротів ділянки лінії.

Мета статті. Визначення виду повної математичної моделі ЛЕП в фазних координатах при урахуванні усіх впливаючих факторів з можливістю комп'ютерної реалізації для дослідження електромагнітних перехідних процесів.

Основні матеріали досліджень. При дослідженні несиметричних чи несинусоїдальних режимів обов'язково враховувати опір землі та наявність заземлених тросів. На рис.2 представлена схема заміщення ідеально транспонованої одноцепної лінії електропередач з урахуванням усіх впливаючих факторів в несиметричних режимах, що складається з однієї ділянки.

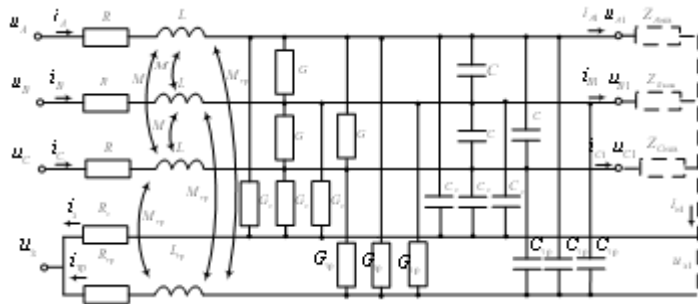


Рис.2 – Схема заміщення одноцепної лінії електропередач з заземленим тросом з обох боків лінії

Струм в кінці лінії визначається згідно з наступної системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_{a1} &= R_{\text{наб}1} i_{a1} + L_{\text{наб}1} \frac{\partial i_{a1}}{\partial t} \\ u_{a2} &= R_{\text{наб}2} i_{a2} + L_{\text{наб}2} \frac{\partial i_{a2}}{\partial t} \\ u_{a3} &= R_{\text{наб}3} i_{a3} + L_{\text{наб}3} \frac{\partial i_{a3}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $R_{\text{наб}}$, $L_{\text{наб}}$ – активний опір та індуктивність навантаження фаз лінії електропередач; n – загальна кількість ділянок dx ЛЕП.

Напруга в кінці лінії та кожної ділянки dx лінії визначається

$$\left. \begin{aligned} u_{a1} &= u_{a1} - \sum_{k=1}^n \Delta u_{a1k} \\ u_{a2} &= u_{a2} - \sum_{k=1}^n \Delta u_{a2k} \\ u_{a3} &= u_{a3} - \sum_{k=1}^n \Delta u_{a3k} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} u_{a1} &= u_{a1-1} - \Delta u_{a1} \\ u_{a2} &= u_{a2-1} - \Delta u_{a2} \\ u_{a3} &= u_{a3-1} - \Delta u_{a3} \end{aligned} \right\}, \text{ де } \left. \begin{aligned} \Delta u_{a1} &= \frac{\partial u_{a1}}{\partial x} \\ \Delta u_{a2} &= \frac{\partial u_{a2}}{\partial x} \\ \Delta u_{a3} &= \frac{\partial u_{a3}}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де k – номер ділянки ($k=[1..n]$).

Падіння напруги на активному та індуктивному опорі ділянки dx лінії дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_{a1}}{\partial x} &= R i_{a1} + \frac{\partial i_{a1}}{\partial t} L + \frac{\partial i_{a2}}{\partial t} M + \frac{\partial i_{a3}}{\partial t} M + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{тр}k}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{a2}}{\partial x} &= R i_{a2} + \frac{\partial i_{a2}}{\partial t} M + \frac{\partial i_{a1}}{\partial t} L + \frac{\partial i_{a3}}{\partial t} M + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{тр}k}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{a3}}{\partial x} &= R i_{a3} + \frac{\partial i_{a3}}{\partial t} M + \frac{\partial i_{a1}}{\partial t} M + \frac{\partial i_{a2}}{\partial t} L + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{тр}k}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $M_{\text{тр}}$ – взаємна індуктивність між тросом та дротами фаз, $i_{\text{тр}k}$ – струм, що протікає в тросі ділянки dx лінії.

Струм на початку лінії та кожної ділянки dx лінії визначається

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= i_{a1} + \sum_{k=1}^n \Delta i_{a1k} \\ i_{a2} &= i_{a2} + \sum_{k=1}^n \Delta i_{a2k} \\ i_{a3} &= i_{a3} + \sum_{k=1}^n \Delta i_{a3k} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} i_{a1-1} &= i_{a1} + \Delta i_{a1} \\ i_{a2-1} &= i_{a2} + \Delta i_{a2} \\ i_{a3-1} &= i_{a3} + \Delta i_{a3} \end{aligned} \right\}, \text{ де } \left. \begin{aligned} \Delta i_{a1} &= \frac{\partial i_{a1}}{\partial x} \\ \Delta i_{a2} &= \frac{\partial i_{a2}}{\partial x} \\ \Delta i_{a3} &= \frac{\partial i_{a3}}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Струм, що відгалужується в активні провідності та ємності ділянки dx лінії дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i_{a1}}{\partial x} &= (u_{a1} - u_{a4})(G_1 + G_{\text{тр}}) + (u_{a2} - u_{a4})G_2 + (u_{a3} - u_{a4})G_3 + \\ &+ (C_1 + C_{\text{тр}}) \frac{\partial(u_{a1} - u_{a4})}{\partial t} + C_2 \frac{\partial(u_{a2} - u_{a4})}{\partial t} + C_3 \frac{\partial(u_{a3} - u_{a4})}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{a2}}{\partial x} &= (u_{a2} - u_{a4})(G_2 + G_{\text{тр}}) + (u_{a1} - u_{a4})G_1 + (u_{a3} - u_{a4})G_3 + \\ &+ (C_1 + C_{\text{тр}}) \frac{\partial(u_{a2} - u_{a4})}{\partial t} + C_2 \frac{\partial(u_{a1} - u_{a4})}{\partial t} + C_3 \frac{\partial(u_{a3} - u_{a4})}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{a3}}{\partial x} &= (u_{a3} - u_{a4})(G_3 + G_{\text{тр}}) + (u_{a1} - u_{a4})G_1 + (u_{a2} - u_{a4})G_2 + \\ &+ (C_1 + C_{\text{тр}}) \frac{\partial(u_{a3} - u_{a4})}{\partial t} + C_2 \frac{\partial(u_{a1} - u_{a4})}{\partial t} + C_3 \frac{\partial(u_{a2} - u_{a4})}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $C_{\text{тр}}$, $G_{\text{тр}}$ – ємність та активна провідність між тросом та дротами фаз.

Струм, що протікає в тросі ділянки dx лінії визначається згідно з диференційного рівняння

$$i_{\text{тр}} R_{\text{тр}} + L_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{тр}}}{\partial t} + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{ф}}}{\partial t} + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{з}}}{\partial t} + M_{\text{тр}} \frac{\partial i_{\text{з}}}{\partial t} = u_{\text{з}} - u_{\text{зк-1}}, \quad (6)$$

де $u_{\text{зк}}$ – потенціал землі в кінці кожної ділянки ЛЕП.

Різниця потенціалів землі кожної ділянки лінії дорівнює

$$u_{\text{зк}} - u_{\text{зк-1}} = (i_{\text{нк}} - i_{\text{трк}} + \frac{\partial i_{\text{трк}}}{\partial x}) R_{\text{з}}, \quad (7)$$

де $R_{\text{з}}$ – активний опір землі, $i_{\text{нк}}$ – струм в уявній нейтралі кожної ділянки dx ЛЕП, що визначається

$$i_{\text{нк}} = i_{\text{Ак}} + i_{\text{Бк}} + i_{\text{Ск}}, \quad (8)$$

$\frac{\partial i_{\text{трк}}}{\partial x}$ – струм, що відгалужується в активні провідності та ємності між

тросом (землею) та дротами фаз кожної ділянки dx , дорівнює

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial i_{\text{трк}}}{\partial x} = [(u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})(G_{\text{з}} + G_{\text{тр}}) + (C_{\text{з}} + C_{\text{тр}}) \frac{\partial (u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})}{\partial t}] + \\ & (u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})(G_{\text{з}} + G_{\text{тр}}) + (C_{\text{з}} + C_{\text{тр}}) \frac{\partial (u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})}{\partial t} + \\ & (u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})(G_{\text{з}} + G_{\text{тр}}) + (C_{\text{з}} + C_{\text{тр}}) \frac{\partial (u_{\text{з}} - u_{\text{зк}})}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким чином, рівняння (1-9) представляють повну математичну модель ЛЕП з урахуванням усіх впливаючих факторів. У разі відсутності грозозахисних тросів та заземлених нейтралей в системі з ЛЕП, рівняння, що описують процеси в названих елементах будуть відсутні в математичній моделі лінії.

Важливою задачею є перерахунок довідникових даних до параметрів моделі. Параметри, що задаються в моделі є: $R, R_{\text{з}}, R_{\text{тр}}, G, G_{\text{з}}, G_{\text{тр}}, C, C_{\text{з}}, C_{\text{тр}}, L, L_{\text{тр}}, M, M_{\text{тр}}$. Зазвичай в довідниках наводяться наступні дані [5]: r – радіус дроту, м; $d_{\text{ф}}$ – середня геометрична відстань між дротами фаз, м; $\Delta P_{\text{кор}}$ – втрати на корону, кВт/км; $R_{\text{пит}}$ – питомий активний опір дроту, Ом/км; l – довжина лінії, км; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга лінії, кВ.

Власна та взаємна індуктивність ділянки dx дроту фази лінії може бути визначена як (Гн) [6]

$$L = 0.000461 \text{г} \frac{D_{\text{з}} l}{r_{\text{еквф}} k}, \quad M = 0.000461 \text{г} \frac{D_{\text{з}} l}{d_{\text{ф}} k},$$

де $D_{\text{з}}$ – глибина проходження еквівалентного струму через землю, $D_{\text{з}} \approx 1000$ м, $r_{\text{еквф}}$ – еквівалентний радіус дроту фази, $r_{\text{еквф}} = 0,95 r_{\text{ф}}$ (для алюмінієвих та сталевалюмінієвих проводів марок А, АС, АСО, АСУ), $d_{\text{ф}}$ – середня геометрична відстань між дротами фаз.

Власна та взаємна індуктивність ділянки dx дроту тросу обчислюється як (Гн) [6]

$$L_{\text{тр}} = 0.000461 \text{г} \frac{D_{\text{з}} l}{r_{\text{еквтр}} k}, \quad M_{\text{тр}} = 0.000461 \text{г} \frac{D_{\text{з}} l}{d_{\text{тр-ф}} k},$$

де $r_{\text{еквтр}}$ – еквівалентний радіус проводу тросу, $r_{\text{еквтр}} = 0,779 r_{\text{тр}}$, $d_{\text{тр-ф}}$ – середня геометрична відстань від тросу до дротів фаз.

Активний опір ділянки dx дроту фази лінії, тросу та землі визначається як (Ом) [6]

$$R = R_{\text{дпит}} \frac{l}{k}, \quad R = R_{\text{трпит}} \frac{l}{k}, \quad R = R_{\text{зпит}} \frac{l}{k},$$

де $R_{\text{дпит}}, R_{\text{трпит}}, R_{\text{зпит}}$ – питомий активний опір дроту фази, тросу та землі відповідно ($R_{\text{зпит}} = 0.05$ Ом/км [6]).

Ємність між дротом фази та землею, між дротами фаз, між тросом та дротом фази ділянки dx , визначаємо відповідно як (Ф) [7]

$$C_{\text{з}} = (\beta_{\text{з}} + 2\beta_{\text{ф}} + \beta_{\text{тр}}) \frac{l}{k}; \quad C_{\text{ф}} = -\beta_{\text{ф}} \frac{l}{k}; \quad C_{\text{тр}} = -\beta_{\text{тр}} \frac{l}{k},$$

де $\beta_{\text{з}}, \beta_{\text{ф}}, \beta_{\text{тр}}$ – відповідні ємнісні коефіцієнти, що обчислюються за наступними формулами (Ф/км) [7]

$$\beta_{\text{з}} = \frac{\Delta_{\text{з}}}{\Delta_{\Sigma}}; \quad \beta_{\text{ф}} = \frac{\Delta_{\text{ф}}}{\Delta_{\Sigma}}; \quad \beta_{\text{тр}} = \frac{\Delta_{\text{тр}}}{\Delta_{\Sigma}},$$

де $\Delta_{\Sigma}, \Delta_{\text{з}}, \Delta_{\text{ф}}, \Delta_{\text{тр}}$ – визначники матриць

$$\Delta_{\Sigma} = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{з}} & \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{з}} & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{з}} \end{pmatrix}, \quad \Delta_{\text{з}} = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{з}} & \alpha_{\text{ф}} \\ \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{з}} \end{pmatrix}, \quad \Delta_{\text{ф}} = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{з}} \\ \alpha_{\text{з}} & \alpha_{\text{ф}} \end{pmatrix},$$

$$\Delta_{\text{тр}} = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{ф}} \\ \alpha_{\text{ф}} & \alpha_{\text{тр}} \end{pmatrix}.$$

де $\alpha_{\text{з}}, \alpha_{\text{ф}}, \alpha_{\text{тр}}$ – відповідні потенційні коефіцієнти ($\alpha_{\text{тр-з}}$ – потенційний коефіцієнт між тросом та землею), що обчислюються за наступними формулами (кВ/Ф) [7]

$$\alpha_{\text{з}} = 41,51 \text{г} \frac{D_{\text{з}} - u_{\text{з}}}{r_{\text{еквф}}} 10^6; \quad \alpha_{\text{ф}} = 41,51 \text{г} \frac{D_{\text{ф-звф}}}{d_{\text{тр-ф}}} 10^6;$$

$$\alpha_{\text{ф}} = 41,51 \text{г} \frac{D_{\text{ф-звф}}}{d_{\text{ф}}} 10^6; \quad \alpha_{\text{тр}} = 41,51 \text{г} \frac{D_{\text{тр-звф}}}{r_{\text{еквтр}}} 10^6,$$

де $D_{\text{ф-зв}}$ – середня відстань дротів фаз до їх дзеркальних відображень відносно поверхні землі; $D_{\text{тр-звф}}$ – середня відстань від тросу до дзеркальних відображень дротів фаз відносно поверхні землі; $D_{\text{ф-звф}}$ – середня відстань від дротів фаз до дзеркальних відображень дротів сусідніх фаз відносно поверхні землі; $D_{\text{тр-зв}}$ – відстань від тросу до його дзеркального відображення відносно поверхні землі. Вище наведені відстані залежать від конструктивного виконання опор ліній

електропередач і можуть бути обчислені згідно з їх геометричних характеристик, що наводяться в довідниках [8, 9].

Сумарна активна провідність дроту фази, що враховує провідність між фазами, фазою і землею та фазою і тросом обчислюється за формулою [9]

$$G = \frac{\Delta P}{U_{\text{ном}}} I [C_{\text{М}}].$$

Зазвичай, сумарне значення втрат на корону визначають експериментально, тому точне визначення значення кожного виду активної провідності не можливе. При врахуванні втрат на корону під час моделювання можна сумарну активну провідність рівномірно розділити між всіма видами провідності.

Висновки. Таким чином, за допомогою наведеної математичної моделі можна створити комп'ютерну модель ЛЕП для дослідження як перехідних, так і усталених режимів з отриманням миттєвих значень реальних фізичних величин при різних режимах роботи електричної системи.

Список літератури. 1. *Закарюкин В.П.* Сложносимметричные режимы электрических систем / В.П.Закарюкин, А.В.Крюков ; под. ред. А.В.Крюкова. – Иркутск : Изд-во ИргУПС. – 2005. – 273с. 2. *Веприк Ю.Н.* Математическое моделирование воздушных линий с тросами в несимметричных режимах / Ю.Н. Веприк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2012. – 5/8(59). – С.30-34. 3. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник / О.В. Кириленко, М.С.Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608с. 4. *Бернас С.* Математические модели элементов электроэнергетических систем / С.Бернас, З.Цек ; пер. с польск. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312с. 5. Справочник по электрическим сетям 35-1150 кВ. – М.: ОАО «Энегростройпроект», 2004. – 109с. 6. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520с. 7. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1964 – 750с. 8. Справочник по проектированию линий электропередачи / М.Б. Вязьменский, В.Х. Ишкин, К.П. Крюков и др. ; под ред. М.А. Реута, С.С. Рокотяна. – М.: Энергия, 1980. – 296с. 9. *Гологорский Е.Г.* Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4-750кВ / Е.Г. Гологорский, Кравцов А.Н., Узелков Б.М.; под ред. Е.Г. Гологорского. – М.: Энас, 2007. – 560с.

Надійшла до редколегії 5.11.2013

УДК 621.314

Математична модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів / Рудевич Н.В. // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетика: надежность и энергоэффективность. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 59 (1032). – С. 117 – 123

В статье рассмотрено математическую модель линии электропередач в фазных координатах для исследования электромагнитных переходных процессов. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: математическая модель, линия электропередач.

In the article the mathematical model of the power lines in the phase coordinates for the study of electromagnetic transients

Keywords: mathematical model, power line.

УДК 621.311

Г.А. СЕНДЕРОВИЧ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕКУЩЕМ РЕЖИМЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В статье обоснованы подходы цифро-аналогового преобразования дискретных выборок трехфазного периодического сигнала в частотные составляющие, представляемые комплексными числами. Особенностью преобразования является получение токов и напряжений трехфазной электрической сети, а также их гармонических составляющих, в виде векторов на единой комплексной плоскости.

Ключевые слова: контрольно-измерительные комплексы, трехфазная электрическая сеть, высшие гармоники, единая комплексная плоскость

Введение. При оценке качества электрической энергии (КЭ) с определением долевого участия поставщиков и потребителей в ответственности и за нарушения требований ГОСТ [1] спектральный анализ несинусоидальных кривых напряжений, широко используемый для оценки КЭ, оказывается недостаточным. Возникает потребность в получении токов и напряжений трехфазной электрической сети, а также их гармонических составляющих, в виде векторов на единой комплексной плоскости. Решать эту задачу для текущих режимов электрической сети позволяют современные контрольно-измерительные комплексы.

Целью статьи является обоснование цифро-аналогового преобразования выборок трехфазного периодического сигнала в гармонические составляющие токов и напряжений, связанные единой комплексной плоскостью. Цифровой регистратор фиксирует дискретные значения трех напряжений и фазных токов. Преобразование дискретных выборок продолжительного периодического сигнала для заданной временной области в частотные составляющие, представляемые комплексными числами, не является задачей новой, решается путем использования дискретных преобразований Фурье. Для сорока рассматриваемых гармоник напряжений, что соответствует требованиям [1], и m выборок прямые дискретные преобразования Фурье можно представить в матричной форме через комплексные числа [2]:

$$\begin{bmatrix} U(A_1) \\ \vdots \\ U(A_n) \\ \vdots \\ U(A_p) \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 1 & W^k & \dots & W^{k(m-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^{2k} & \dots & W^{2k(m-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^{(m-1)k} & \dots & W^{(m-1)k(m-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(t_0) \\ \vdots \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{m-1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

© Г.А. Сендерович, 2013

где $\underline{U}(f_k)$ – комплексное значение k -ой гармоники напряжения;

\underline{W} – единичный вектор ($\underline{W} = e^{-j\frac{2\pi}{m}}$);

$u(t_i)$ – i -я выборка из m значений напряжения для заданного диапазона усреднения;

В сжатом виде уравнение (1) можно записать как

$$\overline{\underline{U}}(f_k) = \frac{1}{m} \cdot \overline{\underline{W}}^{ki} \cdot \overline{\underline{u}}(t_i), \quad (2)$$

где $\overline{\underline{U}}(f_k)$ – вектор-столбец сорока гармонических составляющих напряжения;

$\overline{\underline{u}}(t_i)$ – вектор-столбец m значений выборок напряжения;

$\overline{\underline{W}}^{ki}$ – матрица размера $m \times 40$ единичных векторов ($\underline{W} = e^{-j\frac{2\pi}{m}ki}$).

Систему комплексных уравнений (1) представим в вещественном виде. Так, для k -го уравнения можно записать, что

$$\underline{U}(f_k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} [\underline{W}^{ki} \cdot u(t_i)] = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} [(\cos \psi_{ki} + j \sin \psi_{ki}) \cdot u(t_i)], \quad (3)$$

где $\psi_{ki} = -k \frac{2\pi i}{m}$.

Комплексное уравнение (3) заменим системой двух вещественных уравнений, составленных для его действительной и мнимой составляющих.

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} \underline{U}(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} [\cos \psi_{ki} \cdot u(t_i)]; \\ \text{Im} \underline{U}(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} [\sin \psi_{ki} \cdot u(t_i)]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Аналогично уравнениям (4) систему комплексных уравнений (1) заменим двумя системами вещественных уравнений:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Re} \underline{U}(f_1) \\ \vdots \\ \text{Re} \underline{U}(f_k) \\ \vdots \\ \text{Re} \underline{U}(f_{40}) \end{array} \right] = \frac{1}{m} \cdot \left[\begin{array}{cccc} 1 & \cos \frac{2\pi}{m} & \dots & \cos \frac{2\pi}{m} (m-1) \\ 1 & \cos \frac{2\pi}{m} k & \dots & \cos \frac{2\pi}{m} k(m-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos \frac{2\pi}{m} 40 & \dots & \cos \frac{2\pi}{m} 40(m-1) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} u(t_0) \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{m-1}) \end{array} \right] \quad (5)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{Im} \underline{U}(f_1) \\ \vdots \\ \text{Im} \underline{U}(f_k) \\ \vdots \\ \text{Im} \underline{U}(f_{40}) \end{array} \right] = \frac{1}{m} \cdot \left[\begin{array}{cccc} 1 & \sin \frac{2\pi}{m} & \dots & \sin \frac{2\pi}{m} (m-1) \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{m} k & \dots & \sin \frac{2\pi}{m} k(m-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{m} 40 & \dots & \sin \frac{2\pi}{m} 40(m-1) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} u(t_0) \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{m-1}) \end{array} \right] \quad (6)$$

Комплексное матричное уравнение (2) преобразуется в систему вещественных матричных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} \overline{\underline{U}}(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \overline{\cos \frac{2\pi}{m} ki} \cdot \overline{\underline{u}}(t_i); \\ \text{Im} \overline{\underline{U}}(f_k) &= -\frac{1}{m} \cdot \overline{\sin \frac{2\pi}{m} ki} \cdot \overline{\underline{u}}(t_i). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Система уравнений (7) описывает измерение ортогональных составляющих гармоник напряжений одной фазы. Для получения напряжений по трем фазам в единой комплексной плоскости следует произвести одновременное сканирование фазных напряжений, что приведет к расширению системы уравнений (7):

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} \underline{U}_A(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \overline{\cos \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_A(t_i); \\ \text{Im} \underline{U}_A(f_k) &= -\frac{1}{m} \cdot \overline{\sin \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_A(t_i); \\ \text{Re} \underline{U}_B(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \overline{\cos \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_B(t_i); \\ \text{Im} \underline{U}_B(f_k) &= -\frac{1}{m} \cdot \overline{\sin \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_B(t_i); \\ \text{Re} \underline{U}_C(f_k) &= \frac{1}{m} \cdot \overline{\cos \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_C(t_i); \\ \text{Im} \underline{U}_C(f_k) &= -\frac{1}{m} \cdot \overline{\sin \frac{2\pi}{m} kt} \cdot \overline{\underline{u}}_C(t_i). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Определение модулей комплексных величин известно и для k -й гармоники фазных напряжений выглядит как

$$\left. \begin{aligned} U_A(f_k) &= \sqrt{\operatorname{Re}U_A^2(f_k) + \operatorname{Im}U_A^2(f_k)}; \\ U_B(f_k) &= \sqrt{\operatorname{Re}U_B^2(f_k) + \operatorname{Im}U_B^2(f_k)}; \\ U_C(f_k) &= \sqrt{\operatorname{Re}U_C^2(f_k) + \operatorname{Im}U_C^2(f_k)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Аргументы комплексных значений k -х гармонических составляющих фазных напряжений должны определяться для всей комплексной плоскости с областью изменения $0 \leq \Psi < 2\pi$:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A(f_k) &= \operatorname{Arctg} \frac{\operatorname{Im}U_A(f_k)}{\operatorname{Re}U_A(f_k)}; \\ \psi_B(f_k) &= \operatorname{Arctg} \frac{\operatorname{Im}U_B(f_k)}{\operatorname{Re}U_B(f_k)}; \\ \psi_C(f_k) &= \operatorname{Arctg} \frac{\operatorname{Im}U_C(f_k)}{\operatorname{Re}U_C(f_k)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Обратные тригонометрические функции в общем случае являются многозначными и дают однозначный ответ только на главной ветви. Для арктангенсов главная ветвь соответствует области: $-\pi/2 < \operatorname{arctg} \Psi < \pi/2$. Значения аргумента Ψ комплексного значения напряжения \underline{U} можно определить, зная квадрант, в котором расположен вектор и угол ψ , определяемый соотношением проекций вектора на оси комплексной плоскости. При этом достаточно использовать область изменения угла $0 \leq \operatorname{arctg} \psi < \pi/2$:

$$\psi = \operatorname{arctg} \left| \frac{\operatorname{Im}U}{\operatorname{Re}U} \right|. \quad (11)$$

В зависимости от квадранта расчет по формуле (11) дает угол ψ , расположенный по-разному относительно вектора напряжения (рис. 1). Расчет аргумента Ψ в зависимости от квадранта приведен в табл. 1. Там же даны признаки определения квадрантов и аргументов при попадании вектора напряжения на оси комплексной плоскости.

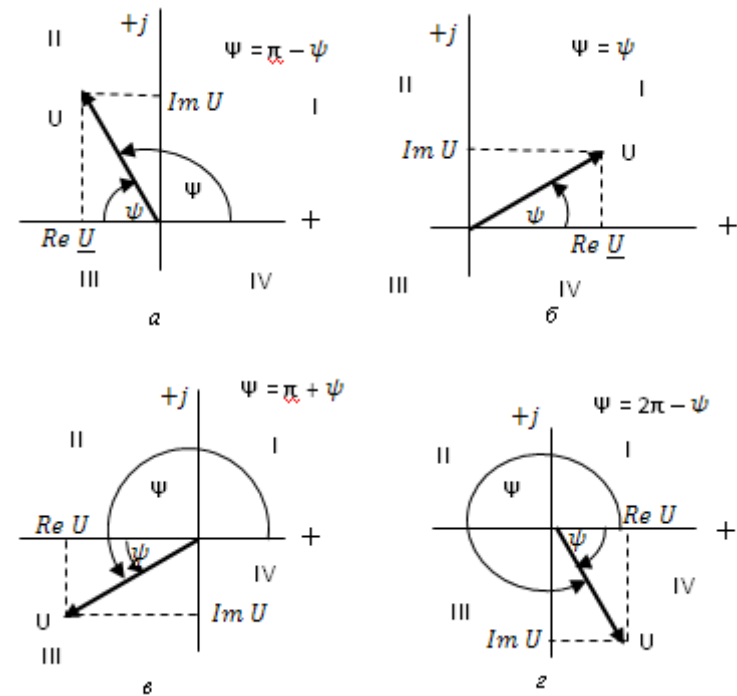


Рис. 1 - Расчет аргумента комплексного значения при расположении вектора напряжения в разных квадрантах: а - в II; б - в I; в - в III; г - в IV.

Таблица – Расчетные выражения для определения аргумента вектора напряжения

Расположение вектора	Re	Im	Ψ	Расчет Ψ
Ось + Re	$\operatorname{Re} \underline{U} > 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} = 0$	$\Psi = 0$	–
I квадрант	$\operatorname{Re} \underline{U} > 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} > 0$	$0 < \Psi < \pi/2$	$\Psi = \psi$
Ось + jIm	$\operatorname{Re} \underline{U} = 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} > 0$	$\Psi = \pi/2$	–
II квадрант	$\operatorname{Re} \underline{U} < 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} > 0$	$\pi/2 < \Psi < \pi$	$\Psi = \pi - \psi$
Ось – Re	$\operatorname{Re} \underline{U} < 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} = 0$	$\Psi = \pi$	–
III квадрант	$\operatorname{Re} \underline{U} < 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} < 0$	$\pi < \Psi < 3\pi/4$	$\Psi = \pi + \psi$
Ось – jIm	$\operatorname{Re} \underline{U} = 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} < 0$	$\Psi = 3\pi/4$	–
IV квадрант	$\operatorname{Re} \underline{U} > 0$	$\operatorname{Im} \underline{U} < 0$	$3\pi/4 < \Psi < 2\pi$	$\Psi = 2\pi - \psi$

При определении гармонических составляющих фазных напряжений выполняется расчет проекций векторов фазных напряжений на ортогональные оси комплексной плоскости для сорока

гармоник ($k = 1 \rightarrow 40$) в соответствии с (8). Расчет проекций всех фазных напряжений производится в единой (общей) комплексной плоскости для каждой k -й гармоники по дискретным выборкам в диапазоне усреднения Δt ($\Delta t = 3$ с в соответствии с [1]). Количество выборок m за период основной частоты T зависит от схемотехники и класса точности прибора (в АНТЭС АК-3Ф $m = 100$). Расчет модулей (9), аргументов (10) комплексных значений выполняется для каждой из трех фаз в соответствии с табл. 1. Аргументы всех комплексных величин приведены к вектору напряжения первой гармоники фазы А, который принят за начальный вектор ($\arg \underline{U}_A(f_1) = 0$). Так, для k -й гармоники

$$\left. \begin{aligned} \arg \underline{U}_A(f_k) &= \Psi_A(f_k) - \Psi_A(f_1); \\ \arg \underline{U}_B(f_k) &= \Psi_B(f_k) - \Psi_A(f_1); \\ \arg \underline{U}_C(f_k) &= \Psi_C(f_k) - \Psi_A(f_1). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Расчет симметричных составляющих фазных токов выполняется с применением формул аналогичных (1)-(12). Аргументы комплексных значений гармонических составляющих токов также должны быть приведены к вектору напряжения первой гармоники фазы А. Соответственно, в формулах (12), представленных для токов, используется тоже вычитаемое $\Psi_A(f_1)$.

Выводы. Рассмотренные цифро-аналоговые преобразования позволяют получить в заданном интервале времени математическое описание векторных значений гармонических составляющих токов и напряжений трехфазной электрической сети, связанных общей комплексной плоскостью.

Список литературы: 1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ). 2. Арриллага Дж. Гармоники в электрических сетях: Пер. с англ / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

Надійшла до редколегії 27.09.2013

УДК 621.311

Измерение гармонических составляющих токов и напряжений в текущем режиме трехфазной электрической сети / Сендерович Г.А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків. НТУ «ХПІ». – 2013. № 59 (1032). С. 124 - 130

У статті обґрунтовані підходи цифро-аналогового перетворення дискретних вибірок трифазного періодичного сигналу в частотні складові, що представляються

комплексними числами. Особливістю перетворення є одержання струмів і напруг трифазної електричної мережі, а також їх гармонійних складових, у виді векторів на єдиній комплексній площині.

Ключові слова: контрольні-вимірювальні комплекси, трифазна електрична мережа, вищі гармоніки, єдина комплексна площина

Approaches of digital-to-analog transformation of discrete selections of a three-phase periodic signal in the frequency components represented by complex numbers are proved in the article. Obtaining current and voltage three-phase network, as well as their harmonic components as vectors in the complex plane is a unified feature of the conversion.

Keywords: control and measuring complexes, three-phase electric network, the highest harmonics, uniform complex plane

Е.Н. ФЕДОСЕЕНКО, ст. преп. НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВАРИАНТА ЗАМЕЩЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Получено подтверждение расчетного варианта замещения вертикального электрода заземления повышенной проводимости с помощью контрольного эксперимента. Сделаны выводы о том, что разработанная модель данного электрода в двухслойной земле как совокупности прямолинейных электродов обеспечивает достаточный для практических расчетов результат.

Ключевые слова: заземляющее устройство, нормируемые параметры, сопротивление растеканию, технический углерод, электробезопасность, электрод заземления.

Постановка проблемы.

Характеристики заземляющих устройств электрических станций и подстанций должны отвечать нормативным требованиям обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала – защите от напряжения прикосновения и шага, – а также нормативным требованиям выполнения ими других наиболее существенных функций: обеспечение действия релейной защиты от замыканий на землю, уменьшение электромагнитного влияния на вторичные цепи, отведение в землю тока молнии и проч.

Приведение величин нормируемых параметров к допустимым значениям выполняется с помощью мероприятий, позволяющих в каждом конкретном случае совершенствовать заземлитель применяя одно из известных конструктивных решений. К числу таких мероприятий принадлежит вариант технического решения по выполнению вертикальных электродов повышенной проводимости. Замещение указанных электродов совокупностью вертикальных электродов, диаметры которых такие же как у соответствующих горизонтальных заземлителей, позволяет использовать возможности известных алгоритмов расчета сложных ЗУ [1].

Анализ литературы.

Вертикальный электрод заземления повышенной проводимости растеканию с достаточной для практических расчетов точностью согласно [2] может быть замещен совокупностью из 12 вертикальных электродов различной длины, расположенных таким образом, чтобы глубина их погружения примерно соответствовала очертанию полуэллипсоида вращения с поверхностью равной поверхности

© Е. Н. Федосеенко, 2013

цилиндра, ограниченного размерами скважины в грунте. Расчетные совокупности электродов, замещающих естественные сосредоточенные заземлители в двухслойной земле по равнозначным электрическим характеристикам, не обоснованы в работах [1, 3, 4]. Способ замещения естественных сосредоточенных заземлителей при расчетах сложных ЗУ электроустановок в двухслойной земле с заданным предложен в работе [5], а в работе [6] реализован применительно к арматуре железобетонных стоек.

Вертикальные электроды используют, если соотношение удельных сопротивлений слоев двухслойной расчетной модели земли $\rho_1/\rho_2 > 0,8$ (при соотношении $0,1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 0,8$ требуемое значение сопротивления заземлителя могут обеспечить только горизонтальные электроды). Длину вертикальных электродов целесообразно выбирать в зависимости от h по соотношению $l_B \geq 2h$, но не менее 5 м; здесь: h – мощность верхнего слоя, l_B – длина вертикальных электродов [1].

Цель настоящей работы.

Целью настоящей работы является подтверждение полученного варианта замещения вертикального электрода повышенной проводимости с помощью контрольного эксперимента.

Основная часть.

Результаты исследовательских испытаний по диагностике состояния ЗУ ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ» [7] показали, что ЗУ выполнено с соблюдением требований к его сопротивлению, однако, в некоторых местах нарушено конструктивное выполнение заземлителя, обеспечивающее требования техники безопасности по напряжению прикосновения. Результаты выполненных расчетов [7] показали, что после проведения ремонтно-восстановительных работ для условий однофазного КЗ на территории ОРУ-110 кВ ПС значение напряжения прикосновения на рабочих местах у оборудования, на котором могут производиться оперативные переключения, снизилось, но превышает допустимое значение.



Рис. 1– Скважины под электроды повышенной проводимости растеканию

С целью обеспечения нормативных значений напряжения прикосновения, где оно превышает допустимые значения, в дополнение к рекомендациям [7] на ОРУ-110 кВ были выполнены два вертикальных электрода повышенной проводимости растеканию. В стороне от заземляющей сетки (минимальное удаление от периферийных горизонтальных электродов ЗУ 5,5 м) пробурены две скважины диаметром 0,33 м и глубиной 3 м, расстояние между которыми 5,1 м (рис. 1). В центр каждой скважины помещался электрод из стальной полосы 40x4 мм² длиной 2,5 м, причем один из электродов имел проводящее антикоррозионное покрытие. Засыпка скважин произведена гранулированным техническим углеродом марки П-803 производства ОАО «Стахановский завод технического углерода». Подсоединение вертикальных электродов повышенной проводимости растеканию выполнено медным изолированным проводом сечением 10 мм². Смонтированные экспериментальные образцы электродов показаны на рис. 2; с 17.11.2008 г. они находятся в опытно-промышленной эксплуатации.



Рис. 2 – Вертикальные электроды повышенной проводимости растеканию: а – без покрытия; б – с покрытием.

Расчет сопротивления растеканию электродов повышенной проводимости растеканию применительно к электрическим характеристикам грунта на территории ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ», которые определены в работе [7] и составляют: на глубине до 0,6 м – удельное сопротивление первого слоя равно 28 Ом·м и для второго слоя на глубине от 0,6 м – 35,5 Ом·м, в соответствии с

разработанной в [2] методикой дает значение 6,8 Ом для каждого из электродов.

Измерение сопротивления растеканию экспериментальных образцов электродов с использованием измерителя сопротивления заземления Ф4103-М1 (изготовитель – завод «Мегометр», г. Умань) дало следующие результаты:

- электрод без покрытия – 5,0 Ом;
- электрод с покрытием – 5,4 Ом.

Анализ результатов измерения и сопоставление их с рассчитанным значением показал, что отличие составляет в среднем 30% и вызывается погрешностью измерения электрических характеристик грунта [7]. Можно также отметить, что обоснованная расчетная совокупность замещающих электродов обеспечивает достаточный для практических расчетов результат. Некоторое различие в сопротивлениях растеканию электродов без покрытия и с покрытием объясняется более близким расположением к заземлителю ПС первого из указанных электродов.

Как показывает анализ результатов исследовательских испытаний заземлителя ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ» [7] и измерения сопротивления растеканию экспериментальных образцов электродов повышенной проводимости растеканию значения напряжения в тех местах ОРУ-110 кВ, где оно превышало допустимые значения, снизится до значений меньших допустимых.

Действительно, имеем расчетное сопротивление ЗУ, учитывающее только искусственные заземлители, равно 0,31 Ом [7]; расчетное сопротивление экспериментальных электродов повышенной проводимости растеканию – 3,4 Ом и расчетное сопротивление системы «трос-опора» двух присоединенных к ПС воздушных линий 110 кВ $-\left|z_{ex}\right|=1,6$ Ом (при $Re z_{ex} > Im z_{ex}$) [8]. Тогда расчетное сопротивление ЗУ составляет 0,24 Ом.

Наибольшее расчетное значение падения напряжения на оборудовании при протекании имитационного тока 4,9 А в ЗУ составило согласно [7] 31,95 мВ; в пересчете на ток однофазного КЗ на ОРУ-110 кВ равный 12,02 кА при снижении расчетного значения сопротивления с 0,31 Ом до 0,24 Ом имеем наибольшее значение напряжения прикосновения 61 В, что меньше предельно допустимого значения 65 В при расчетном времени воздействия более 1,0 с.

Заключение.

На этапе проектирования сложных ЗУ электроустановок необходимо учитывать аварийную разность потенциалов между различными точками ЗУ при КЗ на шинах РУ, которая определяется продольными токами КЗ по горизонтальным естественным и

искусственным заземлителем. Выполненный анализ результатов измерения и сопоставление их с рассчитанным значением подтвердили целесообразность разработки технического решения искусственного электрода заземления, обладающего достаточно большой контактирующей с грунтом поверхностью, т.е. электрода заземления повышенной проводимости растеканию, удовлетворяющего требованиям технологичности выполнения, в том числе, в условиях действующих электроустановок. Для возможности использования указанного выше метода моделирования электрод повышенной проводимости растеканию должен быть замещен расчетной совокупностью прямолинейных электродов.

Разработанная модель электрода заземления повышенной проводимости растеканию в двухслойной земле как совокупности прямолинейных электродов обеспечивает достаточный для практических расчетов результат.

Использование электродов повышенной проводимости растеканию направлено на оптимизацию конструктивных характеристик сложных ЗУ электроустановок. В условиях действующих электроустановок электроды повышенной проводимости растеканию есть одним из технических решений по достижению допустимых значений нормативных параметров заземлителя, если указанные параметры превышают допустимые.

Разработанные электроды повышенной проводимости растеканию смонтированы как экспериментальные образцы на ПС «Орджоникидзевская-110 кВ» АК «Харьковоблэнерго»; способ выполнения указанных электродов защищен патентами Украины №№9874 и 23105 «Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій». Перспективы дальнейших исследований в данном направлении заключаются в изучении изменения электромеханических свойств вертикального электрода повышенной проводимости.

Литература: 1. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с. 2. Федосеенко Е.Н., Минченко А.А. Вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию и их замещение при расчетах электрических характеристик сложных комбинированных заземлителей. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, – 2007. – №6/5(30) – С. 56-59. 3. Барбашов И.В., Пухкал В.А. Расчетные эквиваленты железобетонных фундаментов типовых подстанций ограниченной площади // Вестник Харьковского политехнического института, №169, “Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок”. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, - 1980. – Вып. 8. С. 56-58. 4. Линк И.Ю., Колушко Д.Г., Колушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – Киев: ИПМЭ, 2003. – Т.25. №2. С. 99-111. 5. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Замещение естественных сосредоточенных

заземлителей совокупностью электродов при расчетах электрических характеристик сложных заземляющих устройств электроустановок // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – №7. – С. 121-124. 6. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – №28 – С. 97-100. 7. Протокол исследовательских испытаний по диагностике состояния заземляющего устройства подстанции «Орджоникидзе» АК «Харьковоблэнерго». – Харьков: НИПКИ «Молния» Харьков, 2006. – 14 с. 8. Минченко А.А., Березка С.К., Гуль В.І. Удосконалення розрахункової моделі грозостійкості повітряних ліній 110 кВ та вище з тросом: Звіт про НДР (заключний) / Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. інт-т»: №ДР 0108U001458; №ДО 0209U001619. – Харків, 2008. – 67 с.

Надійшла до редколегії 10.10.2013

УДК 621.316

Экспериментальное подтверждение варианта замещения вертикального электрода повышенной проводимости / Федосеенко Е.Н. // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетика: надежность и энергоэффективность. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. - № 59 (1032). – С. 131 – 136.

Отримано підтвердження розрахункового варіанту заміщення вертикального електроду заземлення підвищеної провідності за допомогою контрольного експерименту. Зроблені висновки про те, що розроблена модель даного електроду в двохшаровій землі як сукупності прямолінійних електродів забезпечує достатній для практичних розрахунків результат.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, нормовані параметри, опір розтіканню, технічний вуглець, електробезпека, електрод заземлення.

Confirmation of the indicated substitution for the grounding electrode of increased current spreading conductivity is got by a control experiment. It is concluded that the developed model of the electrode in a two-layer ground as a set of linear electrodes provides sufficient for practical calculations result.

Keywords: grounding connections, normalized parameters, the spreading resistance, carbon, electric safety, grounding electrode.

Ю.М. ФЕДЮШКО, д-р техн. наук, профессор., «Гавриийский государственный агротехнологический университет», Мелитополь;
А. Н. МРАЧКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев;
И. П. РАДЬКО, канд. техн. наук, доцент., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев;
В. А. КОХАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, проф., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев.

НАГРЕВ И ПРОПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПРИ КОММУТАЦИИ

Были проведены исследования зависимости выделяющейся энергии и определяемой этим глубины проплавления контактов в зависимости от величины тока, индуктивности нагрузки, а также теплофизических свойств материала контакта.

Ключевые слова: коммутация, электрические контакты.

Конструктивные размеры электрических контактов зависят от энергии, выделяющейся в межконтактном промежутке, их материала, характера нагрузки, рода тока.

1. Мощность и энергия, выделяющаяся на поверхность контактов. Сопротивление размыкающихся контактов R_t изменяется от 0 до ∞ за время размыкания t_0 и зависит от времени ($t(0 \leq t \leq t_0)$)

$$R_t = R \frac{t}{t_0 - t} \tag{1}$$

где R – активное сопротивление отключаемой нагрузки.

Поэтому процесс размыкания цепи с индуктивностью L_u и сопротивлением R равноценен введению последовательно в такую цепь сопротивления R_t в соответствии с рис.1.

В этом случае закон изменения тока в цепи описывается дифференциальным уравнением

$$iR + L \frac{di}{dt} + U_n = U_0 \tag{2}$$

где $U_n = i \cdot R_t$ – напряжение на контактах выключателя.

Предполагаем, что ток в цепи и напряжение на контактах при отключении чисто активной нагрузки изменяются пропорционально времени.

В этом случае уравнение (2) – линейное и его решение имеет

© Ю. М. Федюшко, А. Н. Мрачковский, И. П. Радько, В. А. Кохановский, 2013

следующий вид

$$i = I_0 \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot B; U_B = U_0 \frac{t}{t_0} \cdot B \tag{3}$$

Коэффициент, зависящий от характера цепи (соотношения R и L) и от времени t_0 .

где I_0 и U_0 – ток нагрузки и напряжение на ней до размыкания контактов.

Коэффициент, зависящий от характера цепи (соотношения R и L) и от времени t_0 .

$$B = \frac{\left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right)^{\alpha - 1}}{1 - \alpha} \tag{4}$$

Параметр $\alpha = \frac{Rt_0}{L}$ представляет по существу отношение

активной энергии, потребляемой цепью за время размыкания контактов, ко всей энергии, запасенной в индуктивностях цепи в виде энергии магнитного поля

$$\left(W_L = \frac{1}{2} LI_0^2 \right)$$

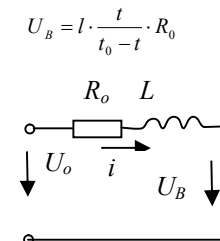


Рис.1 – Схема замещения

Для чистой активной цепи ($L = 0$), $\alpha = \infty$; при чисто индуктивной ($R=0$) нагрузке $\alpha=0$.

Мощность на размыкающихся контактах в каждый момент времени равна

$$P = U \cdot I = UI_0 \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot \frac{t}{t_0} \cdot B^2,$$

Обозначив $\frac{t}{t_0} = \beta$, получим

$$P = U_0 I_0 \beta (1 - \beta) \left[\frac{(1 - \beta)^{\alpha - 1} - \alpha}{1 - \alpha} \right]^2 = U_0 I_0 \eta \tag{5}$$

Коэффициент η зависит от t и α .

Для упрощения расчетов изменение мощности на контактах можно принять по закону:

$$P = U_0 I_0 \beta^\varepsilon, \quad \eta = A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon = A. \quad (6)$$

Значение коэффициентов A и ε для определения мощности при разных значениях параметра α могут быть приближенно найдены из формул:

$$A = \frac{5}{3\sqrt{\alpha}}, \quad \varepsilon = \frac{4}{3\sqrt[3]{\alpha}}, \quad (7)$$

а также из графика на рис 2.

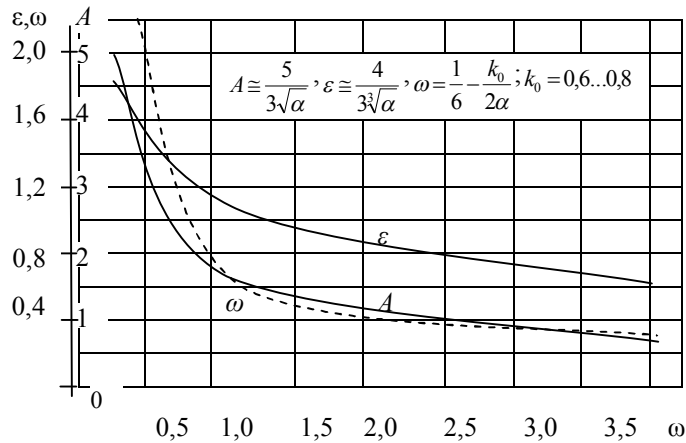


Рис.2 – Зависимость для определения мощности при разных значениях параметра α при различных коэффициентах A и ε

По известной мощности определяется расход энергии на контактах в любой момент времени их размыкания.

Энергия, выделяющаяся на контактах до момента t_1 (меньшего t_0), составляет:

$$Q = \int_0^{t_1} U_0 I_0 A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon dt \quad \text{или} \quad Q = U_0 I_0 \frac{A}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{t^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon}. \quad (8)$$

Вся энергия, затрачиваемая в контактах за время коммутации и определяющая их нагрев и эрозию (плавление), составляет:

$$W = \int_0^{t_0} u i dt = U_0 I_0 \int_0^{t_0} \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot \frac{t}{t_0} B^2 dt. \quad (9)$$

После интегрирования:

$$W = U_0 I_0 t_0 \frac{1}{(1-\alpha)^2} \left[\frac{1}{2\alpha(2\alpha+1)} - \frac{2\alpha}{(\alpha+1)(\alpha+2)} + \frac{\alpha^2}{6} \right]. \quad (10)$$

Из выражения (9) видно, что общая коммутируемая энергия на контактах за время их размыкания составляет:

$$W = \frac{1}{6} U_0 I_0 t_0 + K_0 \frac{L I_0^2}{2} \quad (6a11)$$

или

$$W = U_0 I_0 t_0 \omega \quad (6b12)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий характер нагрузки ($K_0=0,7..0,8$);

$K_0 = 1,0$ - при чисто индуктивной нагрузке;

$K_0 = 0$ - при чисто активной.

Составляющая - есть энергия, расходуемая на контактах при отключении чисто активной нагрузки.

Коэффициент ω , как это видно из формул (9) и (12), зависит от характера цепи и равен

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{K_0}{\alpha} \right).$$

Многочисленными исследованиями [2] установлено, что энергия, отдаваемая в тело контактов и расходуемая на их эрозию, составляет примерно 90% от всей энергии, расходуемой в разрядном промежутке. На излучение расходуется не более 7%.

Характер нагрева массы контактов, температура точек внутри объема контакта t изменение ее во времени устанавливается на основании решения уравнения теплопроводности [3, 4].

Определения момента наступления плавления контактов. Так как сопротивление контактов происходит по поверхности и энергия, выделяющаяся в контактом промежутке, поступает в массу контакта через поверхность, то следует считать, что на поверхности в течении времени t действует плоский источник теплоты.

Уравнение теплопроводности в этом случае такое, при котором изотермические поверхности являются концентрическими сферами (рис.3).

Температура точек зависит только от координаты x и времени t [3, 4], т.е

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dT}{dt} \right), \quad (713)$$

где T – температура точек нагреваемого объема контакта;

α – коэффициент температуропроводности.

В случае действия плоского источника теплоты решение уравнения (13)

$$T = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \cdot \frac{x^4}{4\alpha t}, \quad (7a14)$$

где Q – сила плоского мгновенного источника теплоты, расположенного на плоскости разъема, непосредственно на поверхности контакта при $x=0$

$$Q = \frac{Q_0}{\gamma c} \quad (7b15)$$

где Q_0 – количество теплоты, выделяемой единицей поверхности плоского источника; γ и c – плотность и теплоемкость материала контакта.

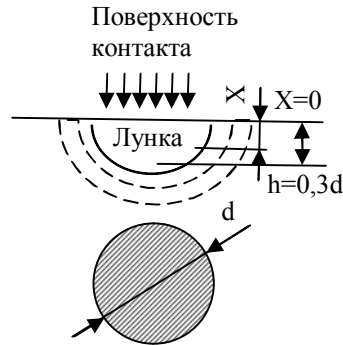


Рис.3 - Определение глубины контакта

Поэтому, если энергия, выделяющаяся в двух контактах за период их размыкания t_0 , составляет W , то сила плоского источника в формуле (7б) составляет:

$$Q = \frac{W}{2\gamma c f_0}$$

где f_0 – величина контактной поверхности.

Решение уравнения (14) определяет распределение температуры на глубину X от поверхности контактов за время t .

Ввиду того, что плавление контактов наступает на их поверхности (при $X = 0$), из уравнения (15) можно найти силу источника теплоты,

при котором за время t_1 температура поверхности достигает температуры плавления $T_{пл}$

$$Q = T_{пл} \cdot 2\sqrt{\pi\alpha t_1} = \frac{Q_0}{\gamma c}.$$

Общее количество энергии, поступившее в оба размыкающихся контакта за время t_1 , и есть общий тепловой поток, который доводит температуру их поверхностей до плавления

$$\frac{1}{2} U_0 I_0 \frac{A}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{t_1^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon} = T_{пл} \cdot 2\sqrt{\pi\alpha t_1} \gamma c f_0. \quad (16)$$

Из этого равенства определяется момент, при котором наступает плавление поверхности контактов

$$t_1^{2\varepsilon+1} = \left[\frac{t_0^\varepsilon (\varepsilon + 1) \cdot 4\sqrt{\pi\alpha} \gamma c T_{пл} f_0}{A U_0 I_0} \right]^2, \quad (17)$$

так как $\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma}$, то:

$$t_1 = \left[\frac{4\sqrt{\pi\lambda\gamma c} \cdot T_{пл} (\varepsilon + 1) t_0^\varepsilon \cdot f_0}{A U_0 I_0} \right]^{\frac{2}{2\varepsilon+1}}, \quad (18)$$

при $\varepsilon = 1$

$$t_1 = \sqrt{\pi\lambda\gamma c \left(\frac{8T_{пл} t_0 \cdot f_0}{A U_0 I_0} \right)^2}. \quad (19)$$

Чем выше температура плавления $T_{пл}$, тем позже наступает оплавление контактной поверхности. Для цепей с индуктивностью, для которых коэффициент A больше, момент наступления плавления контактов сокращается.

3. Расчет глубины проплавления контактов. Теплота, поступающая в контакт в течении всего времени коммутации, нагревает его объем и плавит некоторую часть материала, определяемого глубиной проплавления контактов, к моменту окончания их размыкания t_0 .

В отдельных случаях наступает не только плавление, но и кипение металла и его испарение.

Для определения глубины проплавления введем понятие эффективной температуры, определяемой скрытой теплотой плавления металла.

Эффективная температура – это температура, до которой была бы нагрета расплавленная масса металла при затрате на это теплоты, определяемой скрытой теплоты плавления определяется из выражения:

$$m_1 c_1 T_{эф} = m_1 q_1 \quad (20)$$

где q – скрытая теплота плавления;
 c_1 – теплоемкость металла.

В первом приближении можно считать, что теплоемкость расплавленного металла равна теплоемкости застывшего т. е.

$$T_{эф} = \frac{q}{c_1}$$

Расчетная температура плавления

$$T_{1расч} = T_{пл} + T_{эф} = T_{пл} + \frac{q}{c_1} \quad (21)$$

Глубина лунки расплавления h определяется координатой из уравнения (14).

Расчетная температура кипения

$$T_{2расч} = T_{кип} + \frac{q_{исп}}{c_0} \quad (22)$$

где c_0 – теплоемкость расплавленного металла,
 $q_{исп}$ – скрытая теплота испарения.

Расчетная температура испарения металла

$$T_{расч} = T_{кип} + \frac{q}{c} + \frac{q_{исп}}{c_0} \quad (23)$$

Принимаем, что все количество теплоты, выделяющееся в зоне размыкания контактов, равно энергии, затрачиваемой в контактной паре за время коммутации.

Становится возможным определить глубину проплавления контактов, исходя из решения уравнения теплопроводности (14), из которого следует

$$e^{-\frac{h^2}{4\alpha t_0}} = \frac{T_{расч} \cdot 2\sqrt{\pi\alpha t_0}}{Q},$$

где h – глубина проплавления, координата точек, температура которых достигает $T_{расч}$ к концу размыкания контактов t_0 .

Сила плоского источника, действующего на один контакт через всю энергию, выделяющуюся в контактной промежутке W за время t_0

$$Q = \frac{W}{2\gamma c f_0},$$

то

$$e^{-\frac{h^2}{4\alpha t_0}} = \frac{W}{4\gamma c T_{расч} \sqrt{\pi\alpha t_0} f_0} \quad (24)$$

где $W = U_0 I_0 t_0 \omega$.

Величина контактной поверхности f_0 при плавлении зависит от глубины проплавления. Экспериментально Л. Джонсом [2] установлено соотношение между размерами расплавленной зоны

$$h = 0,3d_0,$$

$$f_e = \frac{1}{4}\pi d_0^2 = 0,95h^2 = \varphi h^2. \quad (25)$$

Определение глубины проплавления h сводится к решению трансцендентного уравнения

$$he^{\frac{h^2}{4\alpha t_0}} = \frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{4\varphi b T_{расч}} \quad (26)$$

где $b = \sqrt{\pi\lambda c\gamma}$ - коэффициент, который определяется только теплофизическими характеристиками материала контакта.

Практически длительность размыкания электрических контактов находится в пределах $t_0 = 0,01 \dots 0,03$ с, глубина проплавления составляет $h = 0,1 \dots 0,6$ мм, поэтому отношение $\frac{h^2}{4\alpha t_0}$ составляет: $0,08 \dots 0,11$, т.к.

коэффициент температуропроводности для металлов $d = 0,3 \dots 0,4$.

Глубина проплавления одного контакта может определяться из формулы

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\varphi b T_{расч}}} \quad (27)$$

Коэффициент b зависит от свойств материала и для разных металлов составляет $30 \dots 70 \cdot 10^3$ Дж/м²·°C·с^{0,5}.

Основные теплофизические характеристики и расчетные температуры плавления для некоторых металлов приведены в таблице 1.

Таблица 1- Основные теплофизические характеристики

Материал	c	γ	λ	$b = \sqrt{\pi\gamma\lambda c}$	$T_{пл}$	$T_{кип}$	$q_{пл} \cdot 10^3$	Расчетная температура	
	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{кг}{м^3}$	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C \cdot с}$	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C \cdot с^{0,5}}$	°C	°C	$\frac{Дж}{кг}$	$T_{1расч}$	$T_{2расч}$
Медь	500	8920	350	70090	1290	2460	213	1710	2880
Серебро	276	10500	372	58240	960	2180	100	1340	2560
Никель	565	8900	58	30310	1460	3000	305	2000	3530
СН-70 (серебро-70%, никель-30%)	360	10000	278	56140	960	2430	123	1420	2880

В таблице 2 приведены значения рассчитанной глубины проплавления контактов в миллиметрах при $U_0=200$ В, неизменной индуктивности 0,5 Гн и токах нагрузки 1; 5; 10 А.

Таблица 2 - Расчетные значения глубины проплавления контактов (в миллиметрах)

Материал	$T_{0 \text{ расч}}$	$I_0 = 1 \text{ А}$		$I_0 = 5 \text{ А}$		$I_0 = 10 \text{ А}$	
		$t_0 = 0,01 \text{ с}$	$t_0 = 0,03 \text{ с}$	$t_0 = 0,01 \text{ с}$	$t_0 = 0,03 \text{ с}$	$t_0 = 0,01 \text{ с}$	$t_0 = 0,03 \text{ с}$
		$\omega = 0,268$	$\omega = 0,197$	$\omega = 0,739$	$\omega = 0,344$	$\omega = 1,342$	$\omega = 0,740$
Серебро	$T_{1 \text{ расч}}$	0,1346	0,1518	0,4998	0,4488	0,9519	0,8405
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,0973	0,1098	0,3613	0,3244	0,6880	0,6076
Никель	$T_{1 \text{ расч}}$	0,1527	0,1724	0,5673	0,5094	1,0800	0,9546
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,1148	0,1298	0,4265	0,3830	0,8120	0,7120
СН-70 (серебро-70%, никель-30%)	$T_{1 \text{ расч}}$	0,0940	0,1061	0,4945	0,4547	0,9423	0,9209
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,1332	0,1503	0,3469	0,3188	0,6608	0,6456

Из которой следует, что глубина проплавления контактов, изготовленных методами порошковой металлургии, типа СН-70 меньше, чем у серебра или никеля.

Выводы: Мощность на размыкающихся контактах с увеличением индуктивности возрастает и имеет максимум в конце размыкания. Энергия, выделяющаяся на контактах, зависит от длительности размыкания и в большей степени от характера нагрузки. Глубина проплавления контактов зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная). С увеличением индуктивности глубина проплавления увеличивается. Увеличение времени размыкания контактов увеличивает глубину проплавления. Особенно это характерно для активной нагрузки цепи. Приведенные расчеты дают возможность подбирать контактные материалы для низковольтных электроаппаратов с учетом характера нагрузки обеспечивающие минимальную эрозию контактных поверхностей.

Список литературы: 1. *Томан А.С.* Электроэнергетические показатели разрывных контактов / *А.С. Томан, С.П. Кохановский* Тр. УСХА, 1975, вып. 110. 2. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления / *К.К. Намитоков*. – М.: Энергия, 1978. – 456 с. 3. *Карслоу Г.С.* Теория теплопроводности / *Г.С. Карслоу*. – М.: Наука, 1947. – 288 с. 4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 599 с. 5. *Вейник А.И.* Приближенный расчет процессов теплопроводности. М., 1959. – 184 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2013

УДК 621.762

Нагрев и проплавление электрических контактов при коммутации / Ю. М. Федюшко, А. Н. Мрачковский, И. П. Радько, В. А. Кохановский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 137–146. – Бібліогр.: 5 назв.

Були проведені дослідження залежності енергії що виділяється та визначеної цим глибини плавлення контактів в залежності від величини струму, індуктивності навантаження, а також теплофізичних властивостей матеріалу контакту.

Ключові слова: комутація, електричні контакти.

The investigations of relivered energy and it's dependense on current magnitude and phisical properties of contact material were held.

Keywords: electrical contact.

П. Я. ПРИДУБКОВ, канд. техн. наук, доц. «Українська державна академія залізничного транспорту», Харків;
І. В. ХОМЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ«ХПІ»

ПРО МАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ МАСИВНИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ТІЛ

Досліджені й уточнені аналітичні залежності, що описують вплив струму, що протікає по матеріальних металевих тілах, на їхню намагніченість і на магнітні параметри поля, що утвориться навколо, а також встановлено вплив геометричних розмірів даних тіл на ці параметри.

Ключові слова: векторний потенціал, намагніченість, магнітні параметри поля, щільність струму.

Вступ. Параметри магнітного поля масивних феромагнітних тіл (заземлювачів, рейкових ниток) визначаються як намагніченістю (магнітним станом) феромагнітного матеріалу, з якого вони виготовлені, так і струмами, що протікають через дані тіла (тяговими струмами, струмами рейкових кіл, струмами заземлювачів).

У формуванні магнітного стану, а відповідно і магнітного поля струмопровідних об'ємних тіл поряд з молекулярними струмами беруть участь і струми провідності, що протікають через дані тіла. Молекулярні струми створюють магнітні моменти магнітних диполів, з яких утворюються спонтанно намагнічені області, що спричиняють залишкову намагніченість об'ємних тіл. Струми провідності формують своє магнітне поле, що впливає, у тому числі й на орієнтацію спонтанно намагнічених областей, що у свою чергу міняє магнітне поле об'ємних тіл.

Параметри магнітного поля, формованого навколо об'ємних струмопровідних тіл при використанні електромагнітних методів дефектоскопії, дозволяють виявити такі дефекти як злами без видимих вад, тріщини у вигляді світлої й темної плям, що перебувають під поверхнею масивного металевого тіла на глибині 4 мм і менш. А також тріщини й злами, які утворюються внаслідок внутрішніх надливів, через газові міхури й інші вади, у результаті недостатньої міцності металу, внаслідок утворення гартівних тріщин.

Таким чином, дослідження магнітного стану об'ємних магнітних струмоведучих тіл, уточнення аналітичних залежностей, що описують вплив молекулярних струмів і струмів провідності на параметри магнітного поля даних тіл, є актуальною проблемою, оскільки рішення даної проблеми дозволить забезпечити теоретичною базою розробку

© П. Я. Придубков, І. В. Хоменко, 2013

(проекування) нових пристроїв (систем) дефектоскопії.

Основна частина. Всі матеріальні тіла володіють тією чи іншою мірою магнітними властивостями, тобто є магнетиками. Присутність даних тіл здатне й змінити існуюче магнітне поле, і збуджувати своє магнітне поле. Внесення магнетиків (наприклад, заліза) у магнітне поле струмів викликає зміну (посилення) цього поля, зумовлену намагнічуванням магнетиків.

Магнітні властивості речовинних тіл обумовлені тим, що елементарні частки, що входять до складу атомів речовини, перебувають у безперервному русі. Електрони електронної оболонки обертаються по замкнутих орбітах. Крім того, і електрони і ядро атома володіють спином. У результаті кожна частка, що входить до складу атома, проявляє себе як елементарний замкнутий струм, магнітні властивості якого можуть бути охарактеризовані його магнітним моментом.

У магнетиках, що відносяться до провідників (метали), варто розрізняти дві складові мікроскопічної щільності струму $\delta_{\text{мікро}}$. По-перше, це струми провідності $\delta_{\text{пр}}$, що відповідають руху електричних зарядів, які переносять макроскопічний струм (вільні електрони в металах), а по-друге, молекулярні струми $\delta_{\text{мол}}$ в нейтральних молекулах, що утворюють тверду кристалічну решітку металів і т.п.:

$$\delta_{\text{мікро}} = \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{мол}} \quad (1)$$

Основними рівняннями магнітного поля є рівняння закону Ампера або закону повного струму:

$$\text{rot}H = \delta \quad (2)$$

і рівняння, що описує принцип безперервності силових ліній магнітного поля, тобто відсутність вільних магнітних зарядів:

$$\text{div}B = 0 \quad (3)$$

Рівняння (2) і (3) представлені в диференціальній формі. Вектори магнітної індукції B й напруженості H магнітного поля для однорідних середовищ зв'язані співвідношенням:

$$B = \mu_a H = \mu_0 (H + J) \quad (4)$$

Порівняння рівнянь (2), (3) і (4) показує, що магнітна рівновага встановлюється лише в тому випадку, якщо вектор магнітної індукції B одночасно підкоряється рівнянням:

$$\text{div}B = 0, \quad \text{rot}B = \mu_a \delta \quad (5)$$

Рішенням рівнянь (5) є співвідношення:

$$B = \text{rot}A, \quad (6)$$

у якому вектор A підкоряється рівнянням [1]:

$$\nabla^2 A = -\mu_a \delta, \quad \text{div}A = 0 \quad (7)$$

З рішенням у вигляді (6) перше з рівнянь (5) виконується автоматично, тому що дивергенція ротора дорівнює нулю. Друге з рівнянь (5) записується у вигляді:

$$\text{rot rot } A = \text{grad div } A - \nabla^2 A = \mu_a \delta$$

звідки й випливає умова (7).

Загальним рішенням рівнянь (7), що вказують на можливість магнітної рівноваги, є вираз:

$$A = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta}{R} dV, \quad (8)$$

де R – відстань від точки, у якій визначається векторний потенціал, до елемента об'єму dV , на які розбитий весь об'єм V , δ – щільність струму.

Векторний потенціал магнітного поля магнетиків повної щільності струмів $\delta_{\text{мікро}}$, що складається із щільності струмів провідності $\delta_{\text{пр}}$ й щільності струмів молекулярних $\delta_{\text{мол}}$, описується наступною формулою [2]:

$$A = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta_{\text{мікро}} dV}{R} = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta_{\text{пр}} dV}{R} + \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta_{\text{мол}} dV}{R}$$

Перший доданок у правій частині останнього рівняння являє собою векторний потенціал $A_{\text{пр}}$ струмів провідності:

$$A_{\text{пр}} = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta_{\text{пр}} dV}{R}, \quad (9)$$

у той час як її другий доданок це не що інше, як векторний потенціал $A_{\text{мол}}$ молекулярних струмів:

$$A_{\text{мол}} = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta_{\text{мол}} dV}{R} \quad (10)$$

Таким чином, векторний потенціал A магнітного поля при наявності магнетиків складається із двох доданків:

$$A_{\text{мікро}} = A_{\text{пр}} + A_{\text{мол}} \quad (11)$$

У вирази (9) і (10) входять дійсні мікроскопічні щільності струмів, тоді як у макроскопічній теорії поля оперують середніми значеннями мікроскопічних величин, отже, необхідно відповідно перетворити й ці вираження.

Середнє значення $\delta_{\text{пр}}$ по фізично нескінченно малому об'єму є та щільність струмів δ , з якою тільки й оперує макроскопічна теорія, що не вводить явно в розгляд молекулярних струмів, тому:

$$\delta = \delta_{\text{пр}} \quad (12)$$

Таким чином, у макроскопічній теорії поля у вираженні для векторного потенціалу струмів провідності $A_{\text{пр}}$ необхідно замінити $\delta_{\text{пр}}$ на δ :

$$A_{\text{пр}} = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{\delta dV}{R} \quad (13)$$

Для знаходження вектора магнітної індукції B в будь-якій точці магнітного поля, створюваного струмами провідності, необхідно визначити ротор від векторного потенціалу $A_{\text{пр}}$ відповідно до рівняння (6).

$$B = \text{rot } A_{\text{пр}} = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \text{rot} \frac{\delta}{R} dV \quad (14)$$

Але відповідно до диференціальних операцій над скалярами й векторами векторного аналізу [3]:

$$\text{rot} \frac{\delta}{R} = - \frac{[\delta R]}{R^3} \quad (15)$$

тому:

$$B = \text{rot } A_{\text{пр}} = - \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \text{rot} \frac{[\delta R]}{R^3} dV, \quad (16)$$

Таким чином, вектор напруженості H магнітного поля струмів провідності описується виразом:

$$H = - \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{[\delta R]}{R^3} dV \quad (17)$$

Вектору напруженості H магнітного поля, створюваного струмом провідності елемента об'єму dV , тобто струмом, що змінює магнітний стан магнетика, відповідає вираз:

$$H = - \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{[\delta R]}{R^3} dV \quad (18)$$

Тому що для більшості магнітних середовищ вектори намагніченості J й напруженості H магнітного поля зв'язані співвідношенням:

$$J = kH, \quad (19)$$

тут коефіцієнт k – магнітна сприйнятливність середовища, то вираз:

$$J = -k \frac{1}{4\pi} \frac{[\delta R]}{R^3} dV \quad (20)$$

є формулою визначення намагніченості J середовища, обумовленої струмом провідності, що протікає через це середовище.

Векторний потенціал A поля, порушеного елементом об'єму dV магнітного середовища, визначається рівнянням [2]:

$$A = \frac{[JR]}{R^3} dV \quad (21)$$

Тому з урахуванням співвідношення (11) вектору A відповідає вираження, яке після елементарних математичних перетворень здобуває наступний вид:

$$A = \frac{[JR]}{R^3} dV = -\frac{k}{4\pi} \left[\frac{[\delta R]}{R^6} R \right] dV \quad (22)$$

очевидно, що:

$$-\frac{k}{4\pi} \left[\frac{[\delta R]}{R^6} R \right] = -\frac{k}{4\pi} \frac{[[\delta R]R]}{R^6} \quad (23)$$

При розкритті подвійного векторного добутку [4] останнє вираження перетвориться в співвідношення:

$$-\frac{k}{4\pi} \left[\frac{[\delta R]}{R^6} R \right] = -\frac{k}{4\pi} \frac{R(\delta R)}{R^6} + \frac{k}{4\pi} \frac{\delta(RR)}{R^6} \quad (24)$$

Таким чином, векторний потенціал A поля, порушеного елементом об'єму dV магнітного середовища, через який протікає струм щільністю δ , може бути описаний наступною формулою:

$$A = -\frac{k}{4\pi} \frac{R(\delta R)}{R^6} + \frac{k}{4\pi} \frac{\delta}{R^4} \quad (25)$$

або:

$$A = \frac{k}{4\pi} \left(\frac{\delta}{R^4} - \frac{R(\delta R)}{R^6} \right) \quad (26)$$

Для знаходження вектора магнітної індукції dB в будь-якій точці магнітного поля, створюваного й струмами провідності і намагніченістю елементарного об'єму dV необхідно визначити ротор від векторного потенціалу A відповідно до рівняння (6)

$$dB = rot A = rot \frac{k}{4\pi} \left(\frac{\delta}{R^4} - \frac{R(\delta R)}{R^6} \right) dV \quad (27)$$

Щоб визначити параметри магнітного поля (вектори B й H), формованого деяким об'ємом V електропровідного середовища, що володіє магнітними властивостями, необхідно проінтегрувати останній вираз, тобто:

$$B = \int_V rot \frac{k}{4\pi} \left(\frac{\delta}{R^4} - \frac{R(\delta R)}{R^6} \right) dV \quad (28)$$

Тому що величини k і π є величинами постійними, то їх можна винести з під знака інтеграла, тоді:

$$B = \frac{k}{4\pi} \int_V rot \left(\frac{\delta}{R^4} - \frac{R(\delta R)}{R^6} \right) dV \quad (29)$$

Крім того, виконання просторово диференціальної операції rot над добутком вільного вектора δ й скаляра $1/R^6$ приводить до наступного результату:

$$rot \frac{\delta}{R^4} = \frac{4[R\delta]}{R^6} \quad (30)$$

У той час як узяттю аналогічної операції над скалярним добутком радіуса – вектора R й вільного вектора δ , що помножено на скаляр $1/R^6$, відповідає вираз:

$$rot \frac{R(\delta R)}{R^6} = \frac{[\delta R]}{R^6} - \frac{6[RR](\delta R)}{R^8} \quad (31)$$

Тому що векторний добуток двох однакових векторів $[RR]$ дорівнює нулю [4] ($[RR]=0$), вираз (14) спрощується:

$$rot \frac{R(\delta R)}{R^6} = \frac{[\delta R]}{R^6} \quad (32)$$

Таким чином, формула (29), що виражає визначення вектора B за допомогою векторного потенціалу A , описується співвідношенням:

$$B = \frac{k}{4\pi} \int_V \left(\frac{4[R\delta]}{R^6} - \frac{[\delta R]}{R^6} \right) dV \quad (33)$$

Зміна місця знаходження векторів векторного добутку міняє знак даного добутку:

$$\frac{[R\delta]}{R^6} = -\frac{[\delta R]}{R^6} \quad (34)$$

отже, вектору магнітної індукції B відповідає вираз:

$$B = \frac{k}{4\pi} \int_V \left(\frac{5[R\delta]}{R^6} \right) dV \quad (35)$$

Таким чином, напруженість H магнітного поля, створюваного намагніченим тілом, по якому протікає струм щільністю δ , може бути визначена формулою:

$$H = \frac{k}{4\pi\mu_a} \int_V \left(\frac{5[R\delta]}{R^6} \right) dV \quad (36)$$

З огляду на, що $R = r_0 R$, тому:

$$H = \frac{k}{4\pi\mu_a} \int_V \left(\frac{5[r_0\delta]}{R^5} \right) dV, \quad (37)$$

де r_0 – одиничний вектор у напрямку R .

Висновки. Таким чином, отримані вирази (35) і (37) показують, що параметри (вектори B й H) магнітного поля, формованого навколо електропровідних металевих (ферромагнітних) тіл, визначаються їхніми геометричними розмірами, залежать від магнітних властивостей

матеріалу цих тіл і щільності струму, що протікає. Дані формули (35) і (37) можуть бути використані, наприклад, при розробці пристроїв діагностики й контролю справності рейкових ниток та заземлювачів.

Список литературы: 1. *Тоннела М. А.* Основы электромагнетизма и теории относительности / *М. А. Тоннела.* – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 483 с. 2. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества / *И. Е. Тамм.* – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 616 с. 3. *Маделунг Э.* Математический аппарат физики / *Э. Маделунг.* – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 618 с. 4. *Анго А.* Математика для электро- и радиоинженеров / *А. Анго.* – М.: Наука, 1964. – 772 с.

Надійшла до редколегії 10.10.2013

УДК 621.3.01

Про магнітні параметри масивних феромагнітних тіл / П. Я. Придубков, І. В. Хоменко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 147–153. – Бібліогр.: 4 назв.

Исследованы и уточнены аналитические зависимости, описывающие влияние тока, протекающего по материальным металлическим телам, на их намагниченность, и на магнитные параметры поля, образующегося вокруг, а также установлено влияния геометрических размеров данных тел на эти параметры

Ключевые слова: векторный потенциал, намагниченность, магнитные параметры поля, плотность тока.

Analytical dependences, describing influencing of current flowing on material metallic bodies, are explored and specified, on their magnetized, and on the magnetic parameters of the field appearing around, and also influences of geometrical sizes of the given bodies are set on these parameters.

Keywords: vector potential, magnetization, magnetic field properties, current density.

УДК 621.315

Ю.Н. ШУМИЛОВ, д.т.н., проф. зам. директора ГП «НИИВН», Славянск

ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ И ГИРЛЯНД ТАРЕЛЬЧАТЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ЗОНЕ СИЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Показано, что на участках ВЛ в зоне сильных загрязнений характеристики импульсной электрической прочности полимерных стержневых и гирлянд тарельчатых изоляторов должны быть скоординированы.

Ключевые слова: импульсное разрядное напряжение, грозовые отключения, стеклянные изоляторы.

Электрическая прочность внешней изоляции воздушных линий оценивается величиной напряжения поверхностного перекрытия при воздействии грозовых и коммутационных импульсов, а также напряжением перекрытия при переменном напряжении в нормальном эксплуатационном режиме в загрязненном и увлажненном состоянии. Опыт эксплуатации гирлянд линейных изоляторов из традиционных материалов – фарфора и стекла показал, что по числу перекрытий и по тяжести последствий наиболее опасным является нормальный эксплуатационный режим при их увлажнении и загрязнении [1]. В связи с этим длина пути утечки гирлянды и, соответственно, ее длина выбираются по нормальному эксплуатационному режиму [2]. Считается, что при длине гирлянды, выбранной по нормальному эксплуатационному режиму, перекрытие гирлянд на ВЛ вследствие внутренних перенапряжений отсутствует, а перекрытия при атмосферных перенапряжениях в большинстве случаев сопровождаются успешным автоматическим повторным включением (АПВ) и не приводят к перерыву электроснабжения. Такая идеология была использована и при разработке полимерных изоляторов (ПИ) в части выбора изоляционной длины [3]. Длительное время нареканий по этому поводу не возникало. Однако по мере роста объемов применения полимерных изоляторов от электросетевых предприятий стали поступать сообщения об отдельных случаях перекрытия и повреждения полимерных изоляторов, связанных с грозовой деятельностью. Сообщения поступали преимущественно из районов с загрязненной атмосферой, т.е. оттуда, где применение полимерных изоляторов наиболее эффективно. Перекрытия, хотя и

© Ю. Н. Шумилов, 2013

немногочисленные, потребовали детального изучения их причин. При изучении данного вопроса было установлено, что в районах сильных загрязнений наблюдается существенная разница в линейных размерах и импульсных разрядных характеристиках полимерных изоляторов и стеклянных гирлянд. Изучение нормативных документов показало, что эта разница заложена в действующей Инструкции по выбору изоляции ГКД 34.51.101-96 [2]. Согласно данной инструкции для районов I - III СЗА изоляционная длина гирлянд и полимерных изоляторов практически одинакова, однако, по мере увеличения СЗА превышение длины гирлянды над длиной полимерного изолятора возрастает, достигая разницы в 1,66÷1,79 раз для района VII СЗА, рис.1 - 2, табл. 1. то есть полимерные подвески в зонах сильных загрязнений были существенно короче.

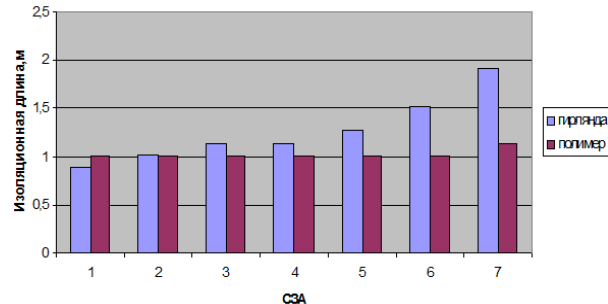


Рис. 1 – Линия 110 кВ, различные степени загрязненности атмосферы

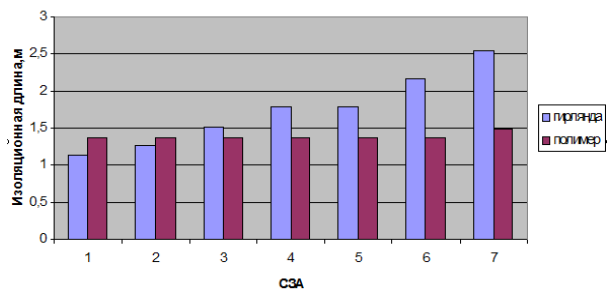


Рис. 2 – Линия 150 кВ, различные степени загрязненности атмосферы

Таблица 1 – Изоляционная длина гирлянды тарельчатых (Г) и полимерных (П) изоляторов для районов с различной СЗА по ГКД 34.51.101-96 [2], м

СЗА	Удельная эффективная длина пути утечки λ_3^* , см/кВ	35 кВ			110 кВ			150 кВ			220 кВ		
		Г	П	К**	Г	П	К**	Г	П	К	Г	П	К**
I	1,9/1,5	0,38	0,358	1,06	0,889	1,008	0,88	1,143	1,365	0,84	1,78	1,858	0,96
II	1,9/1,6	0,38	0,358	1,06	1,016	1,008	1,008	1,27	1,365	0,93	1,905	1,858	1,02
III	2,25/1,9	0,508	0,358	1,42	1,143	1,008	1,13	1,524	1,365	1,17	2,28	1,858	1,23
IV	2,6/2,25	0,508	0,358	1,42	1,143	1,008	1,13	1,78	1,365	1,30	2,67	1,858	1,44
V	3,1/2,6	0,508	0,424	1,2	1,27	1,088	1,17	1,78	1,415	1,25	2,54	2,141	1,19
VI	3,5/3,1	0,635	0,424	1,5	1,524	1,088	1,40	2,16	1,415	1,53	2,92	2,141	1,34
VII	4,2/3,7	0,635	0,424	1,5	1,905	1,139	1,67	2,54	1,415	1,79	3,56	2,141	1,66

I	1,9/1,5	0,38	0,358	1,06	0,889	1,008	0,88	1,143	1,365	0,84	1,78	1,858	0,96
II	1,9/1,6	0,38	0,358	1,06	1,016	1,008	1,008	1,27	1,365	0,93	1,905	1,858	1,02
III	2,25/1,9	0,508	0,358	1,42	1,143	1,008	1,13	1,524	1,365	1,17	2,28	1,858	1,23
IV	2,6/2,25	0,508	0,358	1,42	1,143	1,008	1,13	1,78	1,365	1,30	2,67	1,858	1,44
V	3,1/2,6	0,508	0,424	1,2	1,27	1,088	1,17	1,78	1,415	1,25	2,54	2,141	1,19
VI	3,5/3,1	0,635	0,424	1,5	1,524	1,088	1,40	2,16	1,415	1,53	2,92	2,141	1,34
VII	4,2/3,7	0,635	0,424	1,5	1,905	1,139	1,67	2,54	1,415	1,79	3,56	2,141	1,66

Примечание. *в числителе значения λ_3 приведены для ВЛ 35 кВ, в знаменателе – для ВЛ 110-750 кВ; ** $K = \frac{l_{иг}}{l_{ин}}$

Таблица 2 – Изоляционная длина и 50%-ное импульсное разрядное напряжение ($U_{50\%}$) гирлянд и полимерных изоляторов 35-220 кВ, устанавливаемых в зонах VII СЗА

Показатель	35 кВ	110 кВ	150 кВ	220 кВ
Изоляционная длина $l_{ин}$, см	$\frac{63,50}{35,80}$	$\frac{190,5}{100,8}$	$\frac{254,0}{141,1}$	$\frac{356,0}{214,1}$
50%-ное импульсное разрядное напряжение (длина волны 1,2/50, положительная полярность), кВ	$\frac{580}{276}$	$\frac{1068,7}{614}$	$\frac{1411,6}{824}$	$\frac{1962,4}{1203}$

Примечание. Цифры в числителе относятся к гирляндам, в знаменателе – к полимерным изоляторам.

Это связано с высокими гидрофобными свойствами и отличающейся конфигурацией силиконовой защитной оболочкой у полимерных изоляторов, обуславливающими их высокие влагоразрядные градиенты и, следовательно, возможность сокращения изоляционной длины при выборе линейных размеров по нормальному эксплуатационному режиму. Из табл. 2 видно, что импульсные разрядные характеристики полимерных изоляторов в районе VII СЗА в 1,6-2,1 раз уступают гирляндам тарельчатых изоляторов. Разница в значениях $U_{50\%}$ при импульсных перенапряжениях должна влиять на показатели грозоупорности ВЛ с установленными полимерными изоляторами. Для

оценки грозоупорности ВЛ с полимерными и стеклянными изоляторами были проведены расчеты удельного числа грозовых отключений от разрядного расстояния подвесок, установленных в различных зонах СЗА. Путем обработки данных, приведенных в [4], получено эмпирическое выражение для расчета удельного числа грозовых отключений на однотипных опорах в зависимости от изоляционной длины подвесок $\ell_{и}$. Для ВЛ на стальных опорах башенного типа с одним грозозащитным тросом эмпирическое выражение зависимости удельного числа грозовых отключений n_r от изоляционной длины подвески $\ell_{и}$ имеет вид:

$$n_r = a \times e^{b \times \ell_{и}} \quad (1)$$

где $\ell_{и}$ – изоляционная длина подвески, $a = 38,904$, $b = -0,694$. По формуле (1) проведен расчет грозоупорности ВЛ 110 кВ с подвеской, выполненной из гирлянды стеклянных изоляторов ПС 70Е и ПСД 70 и полимерных изоляторов типа ЛК 70/110 для различных СЗА. Данные расчетов приведены в таблице 3 и показаны на рис.3.

Таблица 3 – Расчетные значения удельного числа грозовых отключений для ВЛ 110 кВ с гирляндами стеклянных и полимерных изоляторов (районы I-VII СЗА)

СЗ А	$\lambda_{з}$, см/кВ	Обозначение изолятора	Кол-во в гирлянде, шт.	Изоляционная длина $\ell_{и}$, м	Длина пути утечки L , см	$+U_{50\%}$, кВ	n_r
I	1,5	ПС 70Е	7	0,889	212,1	520,0	30,49
		ЛК 70/110-3	1	1,008	264,0	614,2	23,97
II	1,6	ПС 70Е	8	1,016	242,4	588,6	21,30
		ЛК 70/110-3	1	1,008	264,0	614,2	23,97
III	1,9	ПС 70Е	9	1,143	272,4	657,2	18,10
		ЛК 70/110-3	1	1,008	264,0	614,2	23,97
IV	2,25	ПСД 70	9	1,143	355,5	657,2	18,10
		ЛК 70/110-4	1	1,008	252,0	614,2	23,97
V	2,6	ПСД 70	10	1,270	395,0	725,8	14,80
		ЛК 70/110-7	1	1,088	345,0	655,8	20,48
VI	3,1	ПСД 70	12	1,524	474,0	862,8	13,99

		ЛК 70/110-7	1	1,088	345,0	655,8	20,48
VII	3,7	ПСД 70	15	1,905	592,5	1068,7	10,38
		ЛК 70/110-7	1	1,088	345,0	655,8	20,48

Примечание. Опоры стальные башенного типа с одним грозозащитным тросом; $R_3 = 30$ Ом; расчет на 100 км и 100 гроз. час. в год; при определении $n_{гр}$ использовались характеристики, полученные при отрицательной полярности импульса.

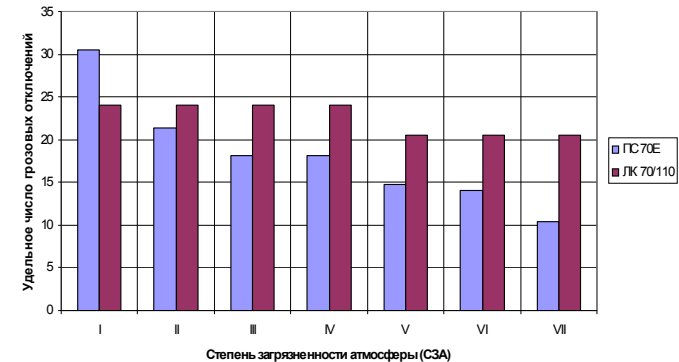


Рис. 3 – Расчетные значения удельного числа грозовых отключений для ВЛ 110 кВ с гирляндами стеклянных и полимерных изоляторов

Как и следовало ожидать, расчетное удельное число грозовых отключений n_r , начиная с III СЗА, для ВЛ с полимерными изоляторами превышает n_r для ВЛ с гирляндами стеклянных изоляторов. Для района VII СЗА расчетное превышение грозовых отключений для линий с полимерными изоляторами составляет 1,97 раз. Это означает, что в районах сильных загрязнений при смешанной установке на линии стеклянных гирлянд и полимерных подвесок при грозовых поражениях ВЛ будут перекрываться преимущественно полимерные изоляторы.

Нужно отметить известный факт, что на линиях 110 кВ и выше на металлических опорах вероятность перехода импульсного перекрытия изолятора в дуговое весьма велика и составляет 0,9-1,0. За время действия защитного отключения (5 – 6 периодов) возможно частичное повреждение полимерной оболочки в зоне действия опорных точек дугового разряда. Опорные точки дуговых разрядов располагаются, как правило, либо на экранных кольцах, либо на поверхности оболочки изолятора вблизи металлических оконцевателей.

На основании изложенного вытекает необходимость осуществления координации полимерных и стеклянных/фарфоровых изоляторов по импульсной прочности (с учётом интенсивности грозовой деятельности и степени загрязнения атмосферы).

Для решения вопросов координации были проведены два вида испытаний:

1) одновременным воздействием грозового импульса напряжения с формой волны 1,2/50 мкс (Рис. 4-5) на параллельно подвешенные гирлянды тарельчатых и полимерных изоляторов; в этом виде испытаний изменением соотношения изоляционных длин гирлянды ($l_{гр}$) и полимерного изолятора ($l_{ип}$) подбиралась равнопрочность подвесок для обеспечения одинаковой грозоупорности участков линии с полимерными изоляторами и стеклянными гирляндами.

2) для подвесок дополнительно определялись вольт-секундные характеристики обеих полярностей импульса при малых значениях предразрядного времени T_c .

Фрагменты испытаний подвесок показаны на рисунках 4 - 7.

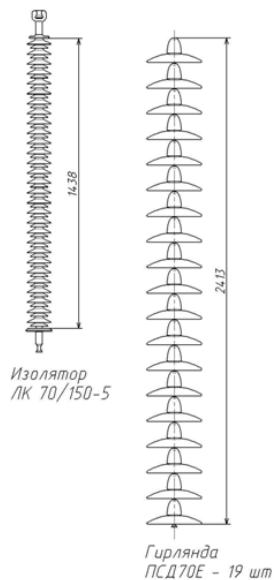


Рис. 4 – Габаритные размеры гирлянды из стеклянных изоляторов ПСД 70Е и полимерного изолятора ЛК 70 – 150 – 5



Рис. 5 – Перекрытие полимерного изолятора ЛК 70 – 150 – 5 при параллельном подключении гирлянды и полимерного изолятора к источнику импульсного напряжения.

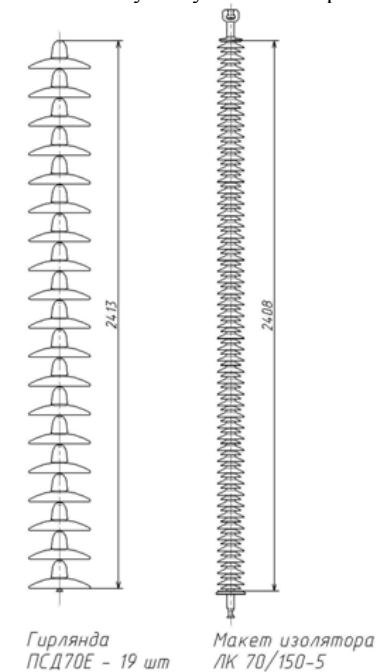


Рис. 6 – Габаритные размеры гирлянды из стеклянных изоляторов ПСД 70Е и макета удлиненного полимерного изолятора ЛК 70 – 150 – 5.



Рис. 7 – Перекрытие гирлянды стеклянных изоляторов при параллельном подключении гирлянды и макета удлиненного полимерного изолятора к источнику импульсного напряжения.

Обработка результатов исследований разрядных характеристики подвесок показала, что равнопрочность достигается при следующих соотношениях изоляционных длин: 5СЗ - ВЛ 150кВ, $l_{инп} = 0,96 \times l_{иг}$; 3СЗ - ВЛ150 кВ, $l_{инп} = 0,97 \times l_{иг}$; 5СЗ- ВЛ 110 кВ, $l_{инп} = 0,97 \times l_{иг}$; 5СЗ- ВЛ 110 кВ, $l_{инп} = 0,99 \times l_{иг}$, где $l_{инп}$ - изоляционная длина полимерного изолятора, $l_{иг}$ - изоляционная длина гирлянды 19×ПСД 70Е. Сопоставление вольт-секундных характеристик (ВСХ) гирлянды стеклянных и полимерных изоляторов (рис. 8) показало, что начиная с времени разряда $T_c = 2$ мкс и меньше, ВСХ полимерных изоляторов значительно круче, чем у гирлянд. Учитывая более крутой рост разрядного напряжения полимерных изоляторов при $T_c < 2$ мкс, можно с некоторым допущением соотношение $l_{инп} / l_{иг}$ уменьшить до 0,9, приняв его в виде:

$$l_{инп} = 0,9 \times l_{иг}. \quad (2)$$

Таким образом, для обеспечения одинаковой грозоупорности полимерной и традиционной изоляции для районов с сильным загрязнением (3-5 СЗ) полимерную изоляцию нужно усиливать путем увеличения её изоляционной длины.

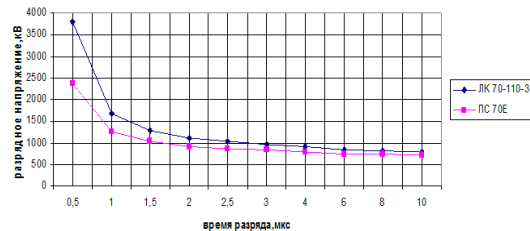


Рис. 8 – Сравнение вольт-секундных характеристик полимерного изолятора ЛК 70-110-3 и гирлянды 8×ПС 70Е, полярность +, в сухом состоянии

Возможны два варианта решения:

1. Разработать новые полимерные изоляторы грязеустойкого исполнения повышенной грозоупорности, увеличив изоляционную длину изолятора до $l_{инп} = 0,9 \times l_{иг}$, сохранив при этом длину пути утечки (λ_3) на уровне нормативных значений согласно ПУЭ:2006, глава 1.9.

2. В загрязненных районах применять полимерную подвеску с изоляторами на один класс напряжения выше, как показано в табл. 4

Таблица 4 – Рекомендации относительно выбора класса напряжения изоляторов

СЗ	Класс напряжения сети, кВ		
	110	150	220
3	ЛК 70-110-5Ц $l_{инп} = 1,139$ м заменяет 10×ПСД 70Е $l_{инп} = 1,127$ м	ЛК 70-220-2Ц $l_{инп} = 1,847$ м заменяет 14×ПСД 70Е $l_{инп} = 1,778$ м	ЛК 70-330-2Ц $l_{инп} = 2,62$ м заменяет 19×ПСД 70Е $l_{инп} = 2,413$ м
5	ЛК 70-220-2Ц $l_{инп} = 1,847$ м заменяет 14×ПСД 70Е $l_{инп} = 1,778$ м	ЛК 70-330-2Ц $l_{инп} = 2,62$ м заменяет 19×ПСД 70Е $l_{инп} = 2,413$ м	2×ЛК 70-220-2Ц $l_{инп} = 3,694$ м заменяет 29×ПСД 70Е $l_{инп} = 3,683$ м

Учитывая повышение стоимости полимерной изоляции, усиленной по грозостойкости, ее применение в каждом конкретном случае должно сопровождаться специальным обоснованием, принимая во внимание следующие факторы: отсутствие на ВЛ грозозащитного троса; величину ущерба, нанесенного предприятию-потребителю электроэнергии в результате простоев, связанных с грозопоражением изоляции ВЛ и др.

Список литературы: 1. Александров Г.Н. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, В.Е. Кизеветтер. – Л. : Энергия, 1969. – 240 с. 2. ГKD 34.51.101-96 Инструкция по выбору и эксплуатации внешней изоляции электроустановок 6-750 кВ на предприятиях Минтопэнерго Украины. 3. Шидловский А.К. Высоковольтные полимерные изоляторы / А.К. Шидловский, Ю.Н. Шумилов, А.А. Щерба, В.М. Золотарев. – К. : Сучасність, 2008. – 252 с. 4. РД 34.35.125-93 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. – Сп.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 353 с.

Надійшла до редакції 2013

УДК 621.315

Импульсная электрическая прочность полимерных стержневых и гирлянд тарельчатых изоляторов в зоне сильных загрязнений / Ю. Н. Шумилов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 154–163. – Бібліогр.: 4 назв.

Показано, що на ділянках ВЛ в зоні сильних забруднень характеристики імпульсної електричної міцності полімерних стержневих і гирлянд тарільчастих ізоляторів мають бути скоординовані.

Ключові слова: імпульсна розрядна напруга, грозові відключення, скляні ізолятори.

It is shown that on the part of HV transmission line in the area of strong contaminations character of impulsive electric durability of polymeric cored and assembly of glass insulators must be co-ordinated.

Keywords: impulse discharge voltage, thunderstorm disconnections, glass insulators.

УДК 621.314

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
В. Б. АБРАМОВ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Киев;
Д. Н. БАКЛАЙ, ассистент, НТУ «ХПІ»;

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ХРОМАТИГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

В статье рассмотрены основные проблемы интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, в том числе факторы, которые влияют на достоверность диагноза, поставленного по результатам анализа растворенных в масле газов. Сформулированы основные направления повышения достоверности интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов.

Ключевые слова: Хроматографический анализ, граничные значения, отношения пар газов, частичные разряды, развивающийся дефект.

Постановка проблемы. Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) является одним из наиболее распространенных видов неразрушающего диагностирования состояния маслонаполненного оборудования. Данный метод разработан в начале 70-х годов прошлого века в Англии, и с того момента нашел широкое применение в большинстве развитых стран. В настоящее время все крупные энергетические компании и трансформаторостроительные фирмы широко применяют ХАРГ, используя при этом различные системы оценки и определения типа дефекта трансформатора. Несмотря на имеющийся положительный опыт применения ХАРГ, существуют и целый ряд проблем, которые возникают при оценке состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования с использованием данного метода. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения основного спектра таких проблем, и путей их решения.

Анализ публикаций. В работе [1] отмечается, что выводы, полученные на основе интерпретации результатов ХАРГ, имеют значительный элемент неопределенности. Так по превышению граничных концентраций газов можно судить лишь о возможном развитии дефекта. Определенная степень нечеткости ХАРГ имеет место и при определении типа дефекта, и самое главное при принятии решений о дальнейших действиях, в случае обнаружения дефекта. Как отмечается в [2], с целью выявления местонахождения дефектов и

© О. В. Шутенко, В. Б. Абрамов, Д. М. Баклай, 2013

степени их опасности метод ХАРГ должен использоваться как вспомогательный в комплексе с другими диагностическими методами. В работе [3] выделены наиболее значимые данные, необходимые для достоверной постановки диагноза по результатам ХАРГ. В работах [4-11] приводятся результаты анализа отдельных критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ.

Несмотря на значительное количество публикаций, в которых, в той или иной степени, освещаются вопросы достоверности результатов ХАРГ и пути ее повышения, многие аспекты остаются неосвещенными, что и послужило поводом к написанию данной статьи.

Цель статьи. Путем анализа основных проблем, которые возникают при оценке состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования с использованием результатов ХАРГ наметить пути повышения достоверности диагностирования указанного оборудования.

Граничные и типичные концентрации газов. Одним из основных и наиболее часто используемых критериев наличия дефекта в маслонаполненном электрооборудовании является критерий граничных концентраций газов, растворенных в масле такого оборудования. Алгоритм использования этого критерия достаточно прост: если измеренные значения концентраций растворенных в масле газов превышают некоторое нормированное значение, то можно предположить наличие дефекта, тип которого определяется или с помощью отношений пар газов или графических образов.

Как правило, граничные значения концентраций приведены в национальных или международных нормативных документах, но энергокомпании могут определять граничные значения концентраций самостоятельно. Однако, рекомендуемый для определения граничных концентраций подход, основанный на анализе интегральных функций распределения, позволяет определить не граничные, а типичные концентрации газов. Т.е. максимальные концентрации газов, которые могут быть обнаружены у 90–95% оборудования от общего количества, не имеющего признаков дефектов. Данное ограничение является произвольным и связано с тем, что, согласно усредненной мировой статистики, только у 5–10% оборудования могут быть отклонения, приводящие к развитию дефектов. В некоторых методических руководствах типичные значения отождествляются с граничными концентрациями газов, разделяющими бездефектное и дефектное оборудование, что является сомнительным. Учитывая многофакторность процессов газообразования, значения, полученные на основании только статистического анализа даже очень большого

количества результатов ХАРГ оборудования, не имеющего дефектов, вряд ли можно использовать для определения граничных показателей дефектного состояния этого оборудования.

В методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) критерии заданы в виде диапазонов значений концентраций растворенных в масле газов. В отличие от методики ИЕС 60599, эти концентрации газов называются граничными и имеют три уровня: 1 уровень – наличие дефектов не предполагается; при превышении нижней границы диапазона концентраций газов, соответствующих уровню 2, определяется скорость нарастания газов (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки); 3 уровень (превышение верхней границы уровня 2) – прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов.

Рекомендуемые методикой РД 153.34.0-46.302-00 (Россия) критерии концентраций растворенных в масле газов, так же как и в методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, названы граничными значениями.

В методике Energoromiag (Польша) в качестве критериев наличия дефекта используются концентрации газов, названные граничными. Примечательно, что определенные на основании практического опыта допустимые концентрации газов в масле, приняты (по некоторой аналогии с ИЕС 60599) различными для блочных и сетевых трансформаторов.

В методике ИЕС 60599 указан, ограниченный нижним и верхним уровнями, диапазон значений концентраций газов, которые названы типичными. Т.е. таких, которые наблюдаются в 90 % случаев во всех анализируемых трансформаторах. Для случаев, когда концентрации газов превышают эти типичные значения, данная методика (как, впрочем, и большинство других) рекомендует применять критерий скорости нарастания и критериальные отношения пар газов с целью определения опасности, вида (характера) дефекта и корректировки периодичности отбора проб на ХАРГ.

Типичными названы также значения концентраций газов, приведенные в методике IEEE Std C57.104 (США). Они имеют четыре уровня: первый соответствует бездефектному состоянию, остальные – различной степени дефектности.

Помимо статуса, рекомендуемые концентрации отличаются и своими значениями см. табл. 1, что может привести к противоположным («есть дефект – нет дефекта») выводам при их использовании. Очевидно, что противоречивость результатов интерпретации результатов ХАРГ, может быть получена и при использовании граничных значений одной методики, но используемой в разных условиях. Например, при использовании хроматографов с

различным пределом обнаружения газов, при диагностике трансформаторов с различным типом защиты масел, с разным сортом масел и т.д. Все это приводит к необходимости нормировать значения граничных концентраций с учетом наиболее влияющих факторов. В качестве таких факторов, в работе [4], предлагается использовать: особенности конструктивного исполнения трансформаторов (тип защиты, наличие РПН и т. д.), сорт масла, срок эксплуатации, регион в котором эксплуатируется трансформатор и т. д. Однако, выделение наиболее значимых факторов, по результатам эксплуатационных наблюдений, является достаточно сложной задачей, хотя бы в силу многофакторности процессов газовой выделению и отсутствия полной информации об условиях эксплуатации.

В теории технической диагностики, граничные значения признаков определяются на основе анализа статистических распределений диагностических признаков не только для бездефектных, но и дефектных объектов. В случае если области, ограниченные кривыми распределений для двух различных состояний пересекаются, то для определения граничных значений используются методы статистических решений.

Таблица 1 – Типичные значения концентраций растворенных в масле газов рекомендуемые известными методиками

Методика	Уровень концентраций	Растворенные в масле газы				
		CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	H ₂
IEC 60599 (МЭК)	нижний	0,004	0,006	0,0003	0,005	0,006
	верхний	0,011	0,028	0,005	0,009	0,015
IEEE Std C57.104 (США)	–	0,012	0,005	0,0035	0,0065	0,01
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина)	1	<0,005	<0,0015	<0,00005	<0,005	<0,01
	2	0,005-0,012	0,0015-0,01	0,00005-0,001	0,005-0,01	0,01-0,015
	3	>0,012	>0,01	>0,001	>0,01	>0,015
РД 153.34.0-46.302-00 (Россия)	–	0,01	0,01	0,001	0,005	0,01
Energopomiar (Польша)	–	0,02	0,026	0,007	0,017	0,05

Т. е. граничные значения определяются исходя из заранее выбранного критерия. Такими критериями могут быть:

1. Критерий минимума ошибочных решений – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать общее число ошибочных решений;
2. Критерий минимума среднего риска – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать возможный ущерб от принятия ошибочных решений;
3. Минимаксный критерий – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы получить минимальное значение риска среди его максимальных значений. Используется для случаев, когда отсутствуют предварительные статистические сведения о вероятности дефектного и бездефектного состояний оборудования;
4. Критерий Неймана-Пирсона – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать значения вероятности одной из ошибок (пропуск цели или ложная тревога) при заданном значении другой;

Практическая реализация статистического подхода, к определению граничных концентраций затрудняется противоречивостью информации о распределениях концентраций растворенных в масле газов, опубликованной различными исследователями. На наш взгляд причиной таких различий является отличие применяемых методов статистической обработки результатов ХАРГ.

Скорости нарастания газов. Как правило, данный критерий используется для принятия окончательного решения о наличии дефекта в трансформаторе. Согласно национальной методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 решение о наличии дефекта принимается, если концентрации газов превышают граничные значения (уровень 3) и скорость нарастания превышает 30 %. В Российской Федерации данный критерий составляет 10 %. Использование строго фиксированного значения граничных скоростей нарастания без учета характера дефекта, особенностей конструктивного исполнения трансформаторов (тип защиты, наличие РПН и т. д.), сорта масла, срока эксплуатации и других факторов, может привести к принятию ошибочного решения, в т. ч. относительно времени проведения необходимых действий.

Отношения пар газов. В большинстве известных методик для определения типа прогнозируемого дефекта используются отношения пар газов. При этом сами отношения и их количество в различных методиках отличаются (см. табл. 2).

Таблица 2 – Отношения пар характерных газов в различных методиках

Методика	Соотношение пар характерных газов						
	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$	
МЭК	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$	
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$	
РД 153-34.0- 46.302-00	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$	
Дорненбурга	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$			
Мюллера	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$			
Роджерса	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$			
ВЭИ	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{CH_4}$	$\frac{CO}{CO_2}$

Кроме того методики различаются как по количеству распознаваемых дефектов так и по значениям границ диагнозов см табл. 3-5. Как видно из таблиц 3-5, даже при использовании одних и тех же отношений пар газов, и количество распознаваемых дефектов и указанные для них границы значений используемых отношений отличаются. В методике Дорненбурга (таблица 6), кроме этого, используется другой перечень отношений получаемых в результате ХАРГ газов. Очевидно, что одни и те же значения отношений пар газов, при использовании разных методик дадут разный результат.

Таблица 3 – Интерпретация результатов ХАРГ по стандарту МЭК 60599

Диагностическое заключение	Соотношения концентраций характерных пар газов		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Частичные разряды	*	<0,1	<0,2
Начальные ч.р.	>1	0,1-0,5	>1
Критические ч.р.	0,6-2,5	0,1-1	>2

Перегрев при $t < 300$ °С	*	>1 *	<1
Перегрев в диапазоне температуры $300^\circ C < t < 700$ °С	<0,1	>1	1-4
Перегрев при $t > 700$ °С	<0,2**	>1	>4

* Любые значения.

** Повышение концентрации C_2H_2 может свидетельствовать о наличии «горячей точки» с температурой более 1000 °С.

Таблица 4 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике СОУ-Н ЕЕ

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
1	Нормальное старение	*	0,1-1	<0,2
2	Частичные разряды	*	<0,1	<0,2
3	Разряды малой энергии	>1	0,1-0,5	>1
4	Разряды высокой энергии	>1	0,1-1	>2
5	Разряды на поверхности и в толщине изоляции (ползучий разряд)	<1	0,3-0,5	>5
6	Термический дефект, температура 150-300°С	*	>1	<1
7	Термический дефект, температура 300-700°С	*	>1	1-4
8	Термический дефект, температура >700 °С	<0,2	>1	>4

В связи с этим возникает объективная необходимость, выбора отношений, которые бы обеспечили наиболее достоверные результаты интерпретации. В [5] выполнен анализ диагностической ценности различных методов интерпретации ХАРГ. Согласно полученным результатам наибольшей диагностической ценностью (0,93 %) обладает методика МЭК (IEC 60599).

Однако исследования проводились на выборке состоящей только из дефектных трансформаторов, что не позволило проанализировать возможности методик применительно к бездефектным трансформаторам, в которых по тем или иным причинам концентрации газов превышают граничные значения. Кроме того величина диагностической ценности не позволяет оценить значения вероятностей ошибок первого и второго рода, что является немаловажным аспектом при выборе наиболее достоверной методики.

Таблица 5 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике РД 153-34.0-46.302-00

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов		
		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
1	Нормальное старение	<0,1	0,1-1	≤ 1
2	Частичные разряды с низкой плотностью энергии	<0,1	<0,1	≤ 1
3	Частичные разряды с высокой плотностью энергии	0,1-3	<0,1	≤ 1
4	Разряды малой мощности	>0,1	0,1-1	1-3
5	Разряды большой мощности	0,1-3	0,1-1	≥ 3
6	Термический дефект низкой температуры (<150°C)	<0,1	0,1-1	1-3
7	Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°C)	<0,1	≥ 1	<1
8	Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°C)	<0,1	≥ 1	1-3
9	Термический дефект высокой температуры (>700°C)	<0,1	≥ 1	≥ 3

Таблица 6 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике Дорненбурга

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	Отношения концентраций газов			
		CH_4/H_2	C_2H_2/C_2H_4	C_2H_2/CH_4	C_2H_6/C_2H_2
1	Термическое воздействие	>1,0	<0,75	<0,3	>0,4
2	Частичные разряды с малой интенсивностью	<0,1	-	<0,3	>0,4
3	Дуговые процессы	>0,1 <1,0	>0,75	>0,3	<0,4

Графические образы дефектов. Для распознавания типа возможного дефекта, помимо отношений пар газов, рекомендуется использовать графические образы дефектов. Данный метод разработан японскими исследователями на основе практического опыта сопоставления фактически выявленных дефектов в трансформаторе во время внутреннего осмотра с составом газов, выявленных методом ХАРГ. Однако, как и любой из критериев для интерпретации результатов ХАРГ, метод графических образов может приводить к ошибочным решениям. В работе [6] выполнен сравнительный анализ достоверности распознавания типа дефекта с помощью отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что при

использовании графических образов дефектов совпадение поставленного и реального диагнозов составило 94%. Вместе с тем, приведенные результаты показывают, что с помощью графических образов дефектов невозможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образов приведенных в нормативных документах. Выводы, полученные в работе [6] сделаны исключительно на основе анализа данных для трансформаторов, имеющих дефект. Образы дефектов отображают наиболее общие зависимости в отношении между отдельными газами, во время нагревания до различных температур или разрядных процессов. На рисунке 1 приведены графические образы, совпадающие образами дефектов, но полученные для бездефектных трансформаторов.

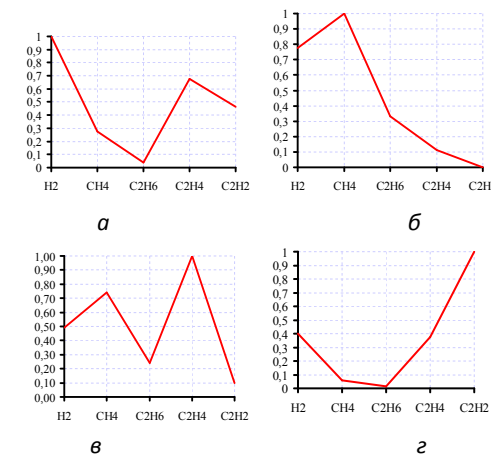


Рис. 1 – Графические образы дефектов, построенные по результатам ХАРГ бездефектных трансформаторов: а – искрение (ползучий разряд) – газ с максимальной концентрацией водород; б – нагрев переходящий в ч. р. – газ с максимальной концентрацией метан; в – высокотемпературный нагрев – газ с максимальной концентрацией этилен; г – дуговой разряд – газ с максимальной концентрацией ацетилен;

Поскольку данные образы получены для трансформаторов, у которых концентрации газов по тем или причинам превысили граничные значения, то существует большая вероятность постановки неправильного диагноза. Учитывая многообразие эксплуатационных

воздействий, которые могут привести к значительному росту концентраций растворенных газов, в масле трансформаторов, не имеющих дефектов [7], представляет практический интерес выполнить анализ графических образов, которые могут быть получены, для трансформаторов, не имеющих дефектов, и находящихся в условиях длительной эксплуатации.

Кроме проблем связанных с нормированием и оценкой достоверности диагностических критериев, значительное влияние на результаты интерпретации ХАРГ оказывает то, как эти критерии применяются на практике. Ниже рассмотрим наиболее часто встречающиеся факторы, которые могут повлиять на достоверность принимаемых решений.

Отсутствие надлежащего учета влияния эксплуатационных воздействий на результаты ХАРГ. Помимо конструктивных особенностей трансформаторов, сорта масла, в некоторых случаях срока службы на результаты ХАРГ значимое влияние оказывают такие факторы как: нагрузка трансформаторов, воздействие токов короткого замыкания, перенапряжений и других.

Так, рост концентраций растворенных в масле газов при воздействии перенапряжений обусловлен переходом начальных частичных разрядов в критические. Исследования, выполненные на трансформаторах 110 кВ, показали, что начальное напряжение частичных разрядов составляет 65 кВ [8]. Т. е. даже при рабочем напряжении в изоляции трансформатора существуют начальные частичные разряды с уровнем 10^{-10} Кл. Под воздействием этих разрядов происходит разложение масла с выделением газов. При воздействии перенапряжений происходит переход от начальных ЧР к критическим в первом масляном канале и сопровождается его пробоем. При этом уровень ЧР возрастает до 10^{-5} Кл. Пробою масляного канала способствует, в первую очередь, неоднородность электрического поля у краев катушек, что приводит к снижению электрической прочности масла. Переход от начальных ЧР к критическим сопровождается резким ростом концентраций газов.

Причинами роста концентраций газов при воздействии токов коротких замыканий могут быть:

1. перегрев обмоток трансформаторов (наблюдаемые токи короткого замыкания как минимум в 3 раза превосходили номинальные токи исследуемых трансформаторов);

2. выдавливание газовых и воздушных включений из обмотки под действием электродинамических сил, приводящих к деформации обмотки. На рис. 2 приведена фотография обмотки, подвергшейся электродинамическим воздействиям токов короткого замыкания.



Рис. 2 – Деформированная обмотка трансформатора из-за воздействия токов короткого замыкания

Как правило, учет влияния данных факторов является крайне затруднительным из-за отсутствия в службах изоляции информации о режимах работы трансформаторов. Кроме того фиксация токов короткого замыкания и перенапряжений требует наличия специальных устройств (например, «Альта», «Рикон», «Регина»), но они установлены не всех подстанциях. Характер изменения приращения суммы газов углеводородного ряда, от значения тока короткого замыкания, для четырех трансформаторов Луганской области, имеющих сходные условия эксплуатации [7], можно оценить по зависимости, приведенной на рис. 3.

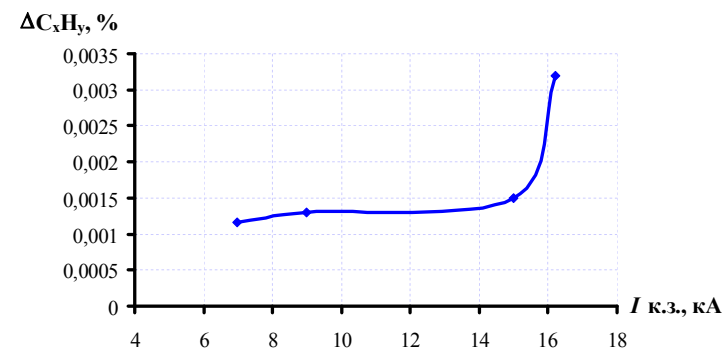


Рис. 3 – Зависимость приращения суммы газов углеводородного ряда от значения токов короткого замыкания, через 100 дней после даты короткого замыкания

В условиях крайней изношенности электрических сетей Украины, учет аварийных режимов работы электрических сетей на результаты ХАРГ является актуальной задачей.

Помимо аварийных режимов работы электрической сети на рост концентраций газов, а, следовательно, и на возможность принятия неправильного решения могут оказать влияние дефекты, не связанные с состоянием трансформатора. В этом легко убедиться на примере трансформатора ПС «Шахта-21» Т-2, «Луганскоблэнерго». Результаты хроматографического анализа приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС «Шахта-21» Т-2, % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
20.07.2007	0,0039	0,0094	0,00001	0,0353	0,0039	0,0257	0,1899

Как видно из таблицы, концентрации этилена соответствуют уровню 3, а метана – уровню 2 из табл. 1, что указывает на возможное наличие дефекта. Критериальные отношения пар газов имеют следующие значения:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00028; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 2,410; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,051,$$

что в соответствии с таблицей 4, можно интерпретировать как термический дефект с температурой более 700°С. Графический образ дефекта, построенный по результатам ХАРГ приведен на рис. 4, также соответствует термическому дефекту.

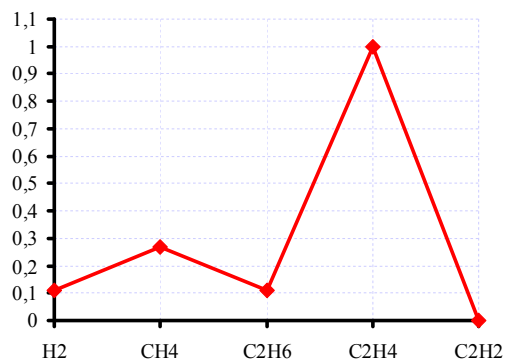


Рис. 4 – Графический образ дефекта в трансформаторе ПС «Шахта-21» Т-2»

Однако, причиной роста концентраций растворенных в масле газов оказался не внутренний дефект трансформатора, а нарушение наружных контактных соединений на низкой стороне трансформатора Т-2, фаза А. Причем данное нарушение было обнаружено с помощью тепловизионного контроля

Нарушения при отборе проб и выполнении анализа. Достоверность результатов ХАРГ во многом будет зависеть от того насколько корректно выполнены процедуры отбора пробы, в каких условиях осуществлялась хранение и транспортировка пробы.

Появление по тем или иным причинам пузырьков воздуха в пробах масла, отобранных на ХАРГ, приводят к искажению результатов в сторону уменьшения фактических концентраций газов [9], а нахождение этих проб под воздействием солнечного освещения (фотоокисление) – к увеличению первоначальных концентраций практически всех газов [10]. Причем степень искажения конечных результатов будет зависеть от продолжительности действия указанных воздействий и от степени старения отобранного масла. В качестве примера в таблице 8 приведены результаты ХАРГ для пробы масла, отобранного из силового трансформатора, проработавшего более 25 лет. Проба была разделена на две части, одна из которых была подвергнута очистке силикагелем для удаления продуктов старения. Перед фотоокислением из обеих частей были удалены все газы, за исключением воздуха.

Таблица 8 – Образование газов при фотоокислении эксплуатационного трансформаторного масла марки Т-750 до и после его сорбционной очистки (длительность фотоокисления - пять суток)

Концентрация газов, растворенных в трансформаторном масле Т-750, ppm											
H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	2-C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	1-C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀
Без очистки ($tg\delta_{\text{масла при } 90^\circ\text{C}} = 5,08\%$)											
11	600	2150	90	50	29	20	18	104	43	458	13
После очистки ($tg\delta_{\text{масла при } 90^\circ\text{C}} = 0,78\%$)											
5	177	1070	38	11	63	13	47	20	36	316	27

Для состаренных масел может наблюдаться еще одно явление: имеют место случаи, когда отбор проб масла в шприцы с металлическим поршнем приводит к спонтанному и нестабильному появлению в этой пробе водорода и ацетилена. Тогда как для проб масла, отобранных из того же оборудования, но в шприцы со стеклянным поршнем, по результатам ХАРГ эти газы отсутствовали [11].

Особо следует отметить, влияние длительных пауз между отбором пробы и проведением ХАРГ, когда отсутствуют воздействия, указанные

выше. Такие паузы приводят к снижению концентраций растворенных в пробе масла газов из-за диффузии их в атмосферу. Зависимость изменения суммы газов углеводородного ряда от количества дней между датами отбора проб и датами проведения анализов, приведена на рис. 5.

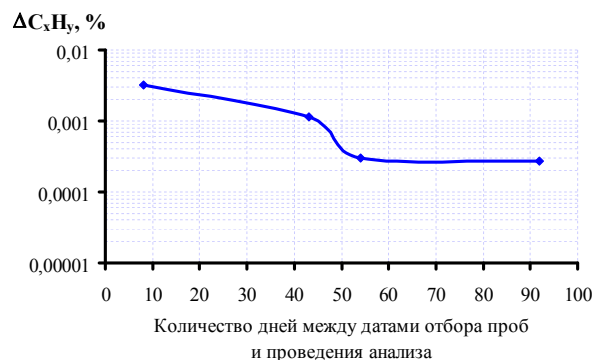


Рис. 5 – Зависимость изменения суммы газов углеводородного ряда от паузы между датами отбора проб и датами проведения анализов

Приведенная зависимость получена для пяти подстанций Луганской области после воздействия однофазного короткого замыкания. Ток короткого замыкания составил 9 кА. Из рисунка видно, что увеличение интервала между датой отбора проб и датой проведения анализа до 54 дней приводит к снижению концентраций газов углеводородного ряда на порядок. Данный факт подтверждает правильность введения жесткой регламентации временного интервала между датой отбора проб и датой проведения хроматографического анализа. Для оборудования, находящегося под усиленным контролем желательно, чтобы анализ проводился в день отбора проб.

Неполный учет рекомендаций нормативных документов по интерпретации результатов ХАРГ. Достаточно часто, неверный диагноз, может быть получен в результате ошибочных действий персонала, на этапе интерпретации результатов ХАРГ. Как правило, такие действия сводятся к частичному невыполнению норм заложенных в национальных методиках. Например, по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов трансформатора ПС «Бердянские жатки», Т-2, ТДН 16000/150 Запорожской области, получены следующие результаты, табл. 9.

Таблица 9 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС «Бердянские жатки», Т-2, ТДН 16000/150, % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
19.12.2011	0,0012	0,0006	0,0024	0,0018	0,00015	0,0168	0,1457

Как видно из табл. 9 концентрация ацетилена превышает, типичное значение концентраций данного газа, рекомендуемое СОУ-ННН 46.501:2006, в 2,4 раза. Графический образ дефекта, построенный по результатам анализа, приведен на рис. 6. Данный образ соответствует дуговому разряду.

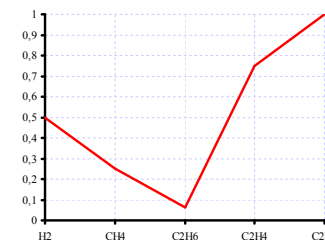


Рис. 6 – Графический образ дефекта в трансформаторе ПС «Бердянские жатки»

Расчетом получены следующие значения критериальных отношений пар газов:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 1,3333; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 0,5; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 12.$$

Что было интерпретировано как дуговой разряд, и, как следствие, принято решение о выводе трансформатора из эксплуатации и проведении ремонта. Стоимость ремонтных работ, выполненных на основании такого анализа результатов ХАРГ в экстренном порядке, составила 1500000 грн. Однако, вопреки рекомендациям указанного СОУ, не был выполнен отбор проб и анализ газов из устройства РПН, и самое главное не рассчитывалось отношение ацетилена к водороду, с помощью которого прогнозируются нарушения герметичности контактора РПН. Для приведенных в табл. 8 результатов отношение $\frac{C_2H_2}{H_2} = 2$, что свидетельствует о нарушении уплотнения бака

контактора РПН и попадании масла из него в бак трансформатора. Выполненное вскрытие трансформатора полностью подтвердило данный диагноз.

Выводы. Таким образом, достоверность решения, принимаемого по результатам ХАРГ, будет определяться как корректностью критериев и их граничных значений, которые регламентированы

нормативными документами, так и возможностью учета и распознавания внешних эксплуатационных воздействий на трансформаторы. Немаловажную роль при этом будет играть также уровень квалификации и ответственности эксплуатационного персонала, принимающего решение. Авторы считают, что повышение достоверности результатов интерпретации ХАРГ может быть достигнуто за счет реализации нескольких направлений:

1. Исследование и максимальный учет на всех этапах интерпретации эксплуатационных факторов, влияющих на концентрации растворенных в масле газов в условиях длительной эксплуатации трансформаторов;
2. Разработка методики анализа достоверности диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ, позволяющая применять из них те, которые обеспечивают максимальную точность при постановке диагноза;
3. Разработка методики определения значений граничных концентраций газов, с учетом влияния эксплуатационных факторов; Разработка методики формирования отношений пар газов, которые бы обеспечивали максимальную достоверность распознавания характера прогнозируемого дефекта;
4. Анализ достоверности диагноза, полученного с использованием графических образов прогнозируемых дефектов;
5. Использование альтернативных подходов к обнаружению развивающихся дефектов и распознаванию причин газовой выделению в трансформаторах;

По мнению авторов, использование более сложных алгоритмов распознавания, должно предполагать применение специальных программных продуктов, которые способны хранить, накапливать и обрабатывать диагностическую информацию и формировать рекомендации в помощь оперативному персоналу подстанций. Речь идет о создании и применении баз данных и автоматизированных систем их ведения, достаточно достоверно и полно отображающих особенности как самого диагностируемого оборудования, так режимов его эксплуатации и диагностических моделей поиска дефектов в этом оборудовании.

Список литературы: 1. Касаткина Т.Е., Львов М.Ю. Опыт применения хроматографического анализа газов для оценки состояния силовых трансформаторов. //Т.Е. Касаткина, М.Ю. Львов //Новое в российской электроэнергетике. – 2001. – № 7. – С. 23–27; 2. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / Г.М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – №10. – С. 24–33; 3. Абрамов В. Б. Особенности контроля маслonaполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов /В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. –

№4. – С. 77 – 79; 4. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных / И.В. Давиденко// Электричество. – 2009. – № 6 – С. 10 – 21; 5. Львов М.Ю. Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования. /М.Ю. Львов// Электрические станции. – 2002. – № 12. – С. 44–51; 6. Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю. Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: Енергетика: надійність і енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №17(990) – С. 180–189; 7. Шутенко О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів / О.В. Шутенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків. – 2008. – Том 1, випуск 73. – С. 45–48; 8. Гурин В.В. Частичные разряды в изоляции высоковольтных трансформаторов /В.В. Гурин, И.С. Калинин, Д.А. Каплан и др. // Электричество. – 1971. – №3. – С. 20 – 24; 9. Абрамов В. Б. Корректировка результатов хроматографического анализа газов в трансформаторном масле при наличии в пробе пузырьков газа /В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Электрические сети и системы. – 2006. – №5. – С. 7 – 14; 10. Абрамов В. Б. Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования. / В. Б. Абрамов, Г. М. Боярчуков, Р. В. Яблонский // Новини енергетики. – 2009. – №9. – С. 17 –32; 11. Абрамов В. Б. Влияние пробоотборников на результаты хроматографического анализа газов, растворенных в масле высоковольтного оборудования. /В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Енергетика та електрифікація. – 2007. – №7(287). – С. 39 – 46.

Надійшла до редколегії 26.09.2013

УДК 621.314

Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О. В. Шутенко, В. Б. Абрамов, Д. Н. Баклай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 164–180. – Бібліогр.: 11 назв.

У статті розглянуто основні проблеми інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, у тому числі фактори, які впливають на достовірність діагнозу, встановленого за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Сформульовано основні напрями підвищення достовірності інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

Ключевые слова: хроматографічний аналіз, граничні значення, відносини пар газів, часткові розряди, дефект що розвивається.

The article describes the main problems of interpretation of the results of chromatographic analysis of dissolved gases in oil, including the factors of the analyzed that influence the accuracy of the diagnosis of the results of dissolved gas in the oil. The basic directions of improving the reliability of the interpretation of the results of chromatographic analysis of dissolved gases in the oil of formulated.

Keywords: chromatographic analysis, boundary values, attitudes pairs of gases, partial discharges, developing defect.

С.А. ЩЕРБИНА, аспирант, НТУ «ХПИ»

ОБОСНОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА - 2М ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Показано, что применение поливинилиденфторида является обоснованным в качестве материала защитной оболочки авиaproводов. Для повышения температуры эксплуатации возникает необходимость радиационного модифицирования. На основании экспериментальных данных определен оптимальный коэффициент облучения фторопласта 2 М.

Ключевые слова: радиационное модифицирование, фторсодержащие полимеры, техническая доза облучения, механические характеристики.

Введение. Производство и потребление политетрафторэтилена в количественном отношении ниже, чем у «большой четверки» полимеров, доминирующих сегодня на мировом рынке (полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид). Однако этот полимер занял определенную нишу, в которой его применение считается наиболее эффективным, а часто и безальтернативным. Уникальные свойства фторсодержащих полимеров выдвинули их в число полимерных материалов, производство и потребление которых постоянно расширяется в связи с расширением номенклатуры изделий для различных отраслей экономики [1, 2]. Фторполимеры являются высокотехнологичной и наукоемкой продукцией. Их производство осуществляется в странах, обладающих высоким научным и техническим потенциалом. Создание технологий и производство фторполимеров потребовали развития химии полимеров, химической технологии в целом, химического машиностроения [3]. Поэтому совершенствование производства и потребления фторполимеров, основанное на современных научных исследованиях, способствует развитию целого ряда смежных отраслей и экономики в целом.

По данным компании The Freedonia Group, Inc., занимающейся исследованиями рынка, мировой рынок фторполимеров стабильно растет

(см. рис. 1). Лидирующее место по производству фторполимеров занимают США, на втором месте Западная Европа, третье место принадлежит Китаю. С 2000 года мировое потребление фторполимеров растет на 5-6 % ежегодно [1].

© С. А. Щербина, 2013

Анализ последних исследований и литературы.

Важным направлением использования фторполимеров является кабельная промышленность [4]. Фторопласты (фторлоны) – техническое название полимеров фторолефинов. Наиболее распространены политетрафторэтилен, политрифторхлорэтилен, поливинилиденфторид.

Фторопласты характеризуются широким диапазоном механических свойств, хорошими диэлектрическими свойствами (таблица 1), высокой электрической прочностью, низким коэффициентом трения, стойки к действию различных агрессивных сред при комнатной и повышенной температуре, атмосферо-, коррозионно- и радиационностойки, слабо газопроницаемы, *негорючи* или самозатухают при возгорании. Плохо растворяются или не растворяются во многих органических растворителях, не растворимы в воде.

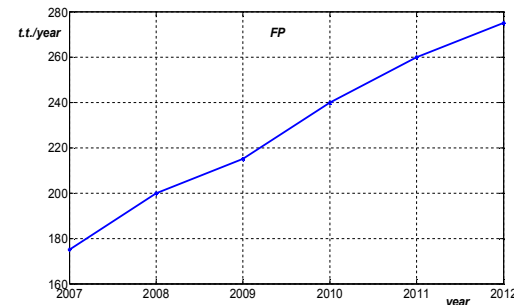


Рис. 1 – Мировой рынок фторполимеров (тыс. тонн в год)

Фторопласт–2М (Ф–2М) представляет собой модифицированный полимер винилиденфторида. Ф–2М значительно уступает фторопласту–4 по теплостойкости (температуре плавления и эксплуатации), диэлектрическим свойствам, антифрикционным и антиадгезионным свойствам. Однако, фторопласт–2М отличается от других фторопластов самой большой прочностью, твердостью (до 90 МПа по Бринеллю), не хладотекут под действием нагрузки, обладает повышенной упругостью, стойкостью к абразивному износу, истиранию, прорезанию, а также устойчивостью к воздействию ультрафиолетовой и ионизирующей радиации. Ф–2М – трудногорючий материал. Диапазон рабочих температур – от минус -40°C до плюс 150°C. Ф–2М легко сваривается и перерабатывается из расплава всеми известными для термопластов способами при сравнительно невысоких температурах (от плюс 180 до плюс 240°C). Эти свойства и определяют необходимость использования поливинилиденфторида в качестве материала защитной оболочки кабелей специального назначения, в частности, авиaproводов.

Для повышения температуры эксплуатации провода с защитной оболочкой на основе ФМ–2 подвергаются физическому модифицированию, т.е. фторсодержащие полимеры поддаются структурированию (сшивке) путем радиационного модифицирования. При таком воздействии изменяются механические, тепловые и электрические свойства защитной фторсодержащей оболочки.

Таблица 1 – Свойства фторопластов

Наименование (марка)	Молекулярная масса, тыс.	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Температура стеклования, °С	Температура разложения, °С	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Температура эксплуатации, °С
Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон, полифлон, альгофлон, флюон)	50-10000	2,15-2,24	270-327	127	425	10 ¹⁷ -10 ¹⁸	От -260 до 260
<u>Политрифторхлорэтилен</u> (фторопласт-3, дайфлон, кель F)	50-200	2,09-2,16	210-215	50	320	10 ¹⁵ -10 ¹⁷	От -195 до 190
<u>Поливинилиденфторид</u> (фторопласт-2, кайнар, KF полимер)	50-200	1,78	150-175	От -20 до -30	400	10 ¹⁰ -10 ¹³	От -45 до 150

Цель статьи:

Обоснование оптимального коэффициента облучения по изменению механических характеристик защитной полимерной оболочки образцов проводов на основе фторопласта – 2 М.

Постановка проблемы.

Технология радиационного модифицирования изоляции кабельных изделий посредством электронно-лучевой сшивки полимеров нашла широкое применение в промышленности [4 – 7]. Сшивка позволяет получить тепловую стабильность материала, что дает возможность реализации продолжительных нагрузок при повышенных рабочих температурах. После сшивки рабочая

температура может достигать от 180°С до 250°С. Верхний диапазон температуры зависит от равномерности и степени сшивки полимера [8 – 10]. Затем обнаружили многие другие преимущества сшитых полимеров.

Применение технологии радиационного модифицирования позволило наладить выпуск широкого ассортимента кабелей для атомных и тепловых станций, нагревательных, морских, кабелей и проводов для авиации, спецтехники. Это все изделия повышенной надежности и несут повышенную нагрузку при экстремальных условиях [8 – 10].

Доза, необходимая для радиационного модифицирования (технологическая доза), зависит как от свойств материала, так и от технических требований, предъявляемых к готовому изделию. Так, в таблице 2 приведены данные зависимости некоторых эксплуатационных свойств фторопласта – 2М от поглощенной дозы излучения [8]. Из этих данных следует, что для снижения усадки в 3 раза достаточно поглощенной дозы 0,05 МГр (5 Мрад), для ликвидации текучести – 0,1 МГр (10 Мрад), для снижения деформации в 2 раза – 0,3 МГр (30 Мрад), а для обеспечения относительного удлинения при разрыве на уровне не менее 100 % поглощенная доза не должна превышать 0,2 МГр (20 Мрад). Поэтому выбор технологической дозы облучения является результатом компромисса между различными свойствами.

Таблица 2 – Влияние дозы облучения на эксплуатационные характеристики поливинилиденфторида

Поглощенная доза, МГр	Усадка изоляции, мм	Показатель текучести расплава (ПТР), г/10 мин	Деформация при продавливании, %	Относительное удлинение при разрыве, %
0	1,6	3,4	100	380
0,02	-	0,8	-	370
0,03	1,45	0,3	-	355
0,05	0,45	0,1	-	310
0,07	0,36	0,02	-	260
0,10	-	0,01	80	200
0,20	-	-	56	105
0,30	-	-	47	52
0,50	-	-	38	-

Качество радиационной обработки зависит как от самого ускорителя, так и от транспортного оборудования комплекса. Ускоритель должен работать при стабильных параметрах электронного пучка: энергия, ток пучка, ширина фронта облучения.

Основным параметром системы при прохождении кабеля в зоне радиации является скорость его транспортировки (протяжки). Она должна быть пропорциональна рабочему току пучка электронов.

Для подбора оптимальной дозы образцы облучают с разным коэффициентом облучения (К), который представляет собой отношение скорости протяжки заготовки под пучком электронов (м/мин) к рабочему току пучка (мА). Диапазон изменения коэффициента достаточно широк: он варьируется от 35 до 95 %.

Материалы исследований:

На основании проведенных испытаний определены технологические режимы радиационного модифицирования для 6 образцов провода с защитной оболочкой на основе фторопласта – 2М с различными коэффициентами облучения (К) 20; 17; 14; 12; 10; 8. Длина образцов 5 – 6 метров. Один образец – контрольный (не подвергался действию радиационного модифицирования). Энергия ускоренных электронов равна 0,52 МэВ. Количество проходов провода под пучком электронов – 60. Рабочий ток пучка – ориентировочно 10 мА.

Результаты исследований:

Результаты испытания облученной фторопластовой оболочки всех образцов: стойкость к тепловой деформации - удлинение под нагрузкой (при температуре 200°C в течение 15 минут – [11]); прочность при растяжении; относительное удлинение при разрыве, - приведены на рис. 2 – 4 соответственно.

При определении стойкости к тепловой деформации (см. рис. 2) для контрольного образца и образцов с коэффициентами облучения 17 и 20 произошел обрыв.

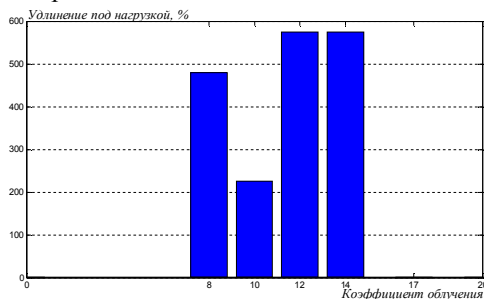


Рис. 2 – Влияние коэффициента облучения на удлинение под нагрузкой облученного фторопласта – 2М

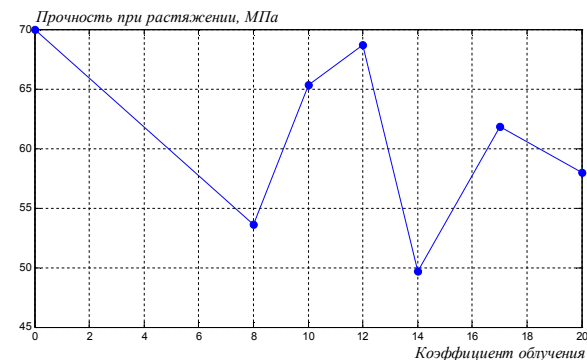


Рис. 3 – Влияние коэффициента облучения на прочность при растяжении облученного фторопласта – 2М

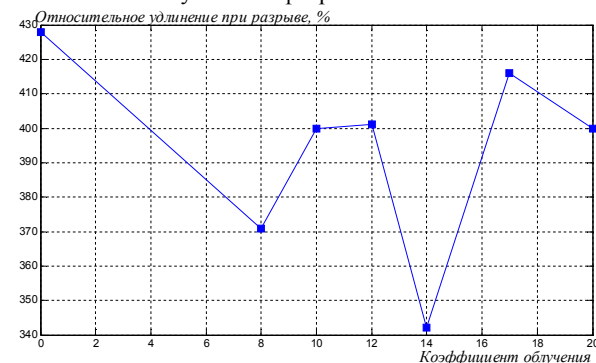


Рис. 4 – Влияние коэффициента облучения на относительное удлинение при разрыве облученного фторопласта – 2М

Полученные результаты свидетельствуют о том, что режим радиационного модифицирования образцов с фторопластовой оболочкой является наиболее оптимальным при коэффициенте облучения $K = 10$. При этом режиме обеспечивается стойкость к тепловой деформации, сохраняются высокие физико-механические свойства.

Выводы:

Таким образом, показано, что технически целесообразно определять оптимальный коэффициент облучения фторопластовой оболочки после радиационного модифицирования исходя из того, что при превышении величины коэффициента происходит процесс деструкции полимера.

Уточнение оптимального значения коэффициента облучения в серийном производстве при использовании фторопласта – 2М в

качестве материала защитной оболочки необходимо уточнить по результатам механических испытаний на основе более представительной статистической выборки образцов.

Список литературы : 1. *Виллемсон, А.Л.* Современное состояние и перспективы мирового рынка фторполимеров / А.Л. Виллемсон // Международные новости мира пластмасс. – 2008. – № 11–12. – С. 20 – 23. 2. *Щербина С.А.* Особенности радиационного модифицирования фторсодержащих полимеров // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетика: надежность и эффективность. Харьков: НТУ «ХПИ». 2012. №. С. 3. *Бузник, В.М.* Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития / В.М. Бузник // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LI. – № 3. – С. 7 – 12. 4. *В.Н Забаев.* Применение ускорителей в науке и промышленности. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 5. *M.R Cleland.* Industrial Applications of Electron Accelerators. CERN Accelerator School. Zeegse, Netherlands, 24 May to 2 June, 2005, p. 383. 6. *M.R Cleland.* High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing. Radiation Processing of Polymers, Hanser Publishers, Munich, and Oxford University Press, New York (1992) p. 23. 7. *S. Machi.* Growing Industrial Applications of Electron Accelerator in Japan. Topical Meeting AccApp09, IAEA Satellite Mtg. Application of Electron Accelerator May 4 - 8, 2009. 8. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин: учебное пособие, под ред. Д.техн.наук пр.И.Б.Пешикова, М.Машиностроение, 2011. - 367с. 9. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией: учебное пособие, Д.Н.Дикерман, В.С.Кунегин, М.: Энергоиздат, 1982. - 145 с. 10. Кабели и провода для энергетических установок: Под ред. Э.Э.Финкеля. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 136с. 11. МЭК 60811-2-1-2006 «Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей», Часть 2 - 1, Специальные методы испытаний эластомерных композиций. Испытания на озоностойкость, тепловую деформацию и маслостойкость., М.: Стандартинформ, 2007. - 7с.

Надійшла в редколегію 03.10.2013

УДК 621.315

Обоснование коэффициента радиационного облучения защитной оболочки на основе фторопласта - 2М по результатам механических испытаний / С.А. Щербина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність і ефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59(1032). – С.181 – 187. Бібліогр.: 11 назв.

Показано, що застосування полівініліденфториду є обґрунтованим в якості матеріалу захисної оболонки авіапроводів. Для підвищення температури експлуатації виникає необхідність радіаційного модифікування. На підставі експериментальних даних визначено оптимальний коефіцієнт опромінення фторопласту 2-М.

Ключові слова: радіаційне модифікування, фторовмісні полімери, технічна доза опромінення.

It is shown, that application PVDF is proved as a material of a protective jacket of aviawires. For operation rise in temperature there is a necessity of radiating modifying. On the basis of experimental data the optimum factor of an irradiation PTFE-2M is defined

Keywords: cable industry, radiation modification, polymers with the maintenance of fluorine, a technical dose of an irradiation, mechanical characteristics.

УДК 621.315.2

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

С.Ю. АНТОНЕЦ, инженер-технолог, ЗАТ «Завод Південкабель»,

Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА КОНТРОЛИРУЕМУЮ ДЕФЕКТНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДА

Выполнен анализ результатов контроля процесса изготовления эмалипровода при высоких скоростях работы современного оборудования, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг количества повреждений изоляционного слоя эмали.

Ключевые слова: эмалипровод, контроль, полимер, дефектность.

Постановка проблемы. Контроль изготовления эмаль проводов выполняют с помощью измерения целого ряда параметров: напряжения пробоя изоляции *Unp*, числа двойных ходов *N* при истирании, числа *er* дефектов на единичной длине провода при испытаниях высоким напряжением на проход и др. Величина *er* (еггог) ограничена сверху (не более), причем, ограничения различны (от 3 до 180) для различных групп однородности изоляции (п.1.4.2 ТУ 16.К71-278-98) и по результатам контроля определяют, к какой группе относится данный провод. Для инновационной продукции, к которой относятся провода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров, на скоростных (до 700 м/мин и более) эмальагрегатах предусмотрен компьютерный мониторинг однородности эмальизоляции, также определяется число *er* дефектов на единичной длине, однако и параметры испытания, и нормативы, в соответствии с которыми определяют, к какой группе относится данный провод, иные. Для сопоставления результатов указанных двух видов контроля количества дефектов необходимо исследование вклада основных факторов, влияющих на однородность изоляции эмальпровода. Данная работа направлена на установление такого влияния со стороны дефектов поверхности медного проводника.

Анализ литературы. Наиболее современную статистическую шкалу уровня однородности для различных видов массовой продукции предлагает так называемая концепция “Шесть сигм” (“6σ”) [1,2], в которой критерием уровня качества продукции является ее однородность [3]. В концепции “6σ” используется классический математический аппарат нормального распределения критических ошибок (еггог). При испытаниях эмальизоляции высоким

© Л. А. Щебенюк, С. Ю. Антоненц, 2013

напряжением на проход величина сильно зависит от скорости движения изолированного провода через электроды [4]. В [5,6] предложено использование не абсолютного (er), а вероятностного параметра дефектности эмальпровода. Очевидно, что без анализа причин неоднородности изоляции эмальпровода сопоставление результатов указанных двух видов контроля числа er дефектов на единичной длине провода при испытаниях высоким напряжением на проход невозможно.

Цель работы. Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируемую дефектность изоляции эмальпровода.

Основные результаты. Очевидно, что на показатели однородности эмали по мере прохождения маршрута эмалирования оказывают влияние и характеристики самой эмали, изменяющиеся по мере прохождения маршрута, и неоднородности на поверхности проволоки. Статистическая модель распределения дефектов в одномерном объекте известна применительно к дефектам изоляции [7]. Исходные статистические соотношения этой модели универсальны, однако физический и статистический смысл решающих соотношений, входящих в них переменных и постоянных для анализа распределения дефектов поверхности меди иной.

Если принять, что точечный пробой на единичной контрольной длине определенный с помощью высоковольтного электрода, через который протягивается образец провода (стандартные испытания) вызван наличием дефекта (выступа, заусенца и т.п.) на поверхности меди, то размер дефекта на медной проволоке под высоковольтным электродом – величина случайная. Обозначим её x . Если размер минимального дефекта, который может вызвать пробой изоляции $x_{кр}$, то для каждой длины провода, соответствующей отрезку провода под высоковольтным электродом L , возможны только два события: появление и не появление пробоя, что равносильно появлению и не появлению дефекта размером, равным или большим критического $x \geq x_{кр}$.

Функция распределения относительного размера дефекта $\xi = x/t$, где толщина слоя эмали, на длине электрода L может быть представлена формулой из [7] и имеет вид:

$$F(\xi) = P\{\theta(\xi)\} = e^{-pa} \left[1 + \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi} \frac{(pae)^{a\xi}}{(a\xi)^{a\xi} \sqrt{a\xi}} d\xi \right], \quad (1)$$

где значение параметра p по условию отражает степень неоднородности поверхности медного проводника $0 \leq p \leq 1$; значение

параметра a представляет собой предел отношения длины высоковольтного электрода к линейному размеру минимального фиксируемого дефекта.

Статистический смысл a – максимальное количество повреждений изоляции, которое может быть зафиксировано при данных испытаниях. Если учесть, что в данных испытаниях дефект фиксируется либо нет на длине электрода, то в этом случае в качестве оценки a можно принять отношение единичной контрольной длины Lk ($Lk = 30$ м) к длине высоковольтного электрода L ($L = 0,125$ м), откуда ориентировочная оценка $a \approx 240$.

Размеры дефектов поверхности меди не зависят от количества проходов через эмалировочную ванну, а по мере прохождения маршрута изменяется относительный размер изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника (противоположно статистической модели в [7]). Соответственно соотношение (1) в данном случае является не функцией распределения относительного размера дефекта ξ на длине электрода L , а функцией распределения относительного размера изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника.

Измеренное количество er точечных пробоев на единичной контрольной длине дает возможность экспериментально оценить вероятность появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника, при котором фиксируется точечный пробой:

$$P\{\Delta > \Delta_{кр}\} = P\{\xi < \xi_{кр}\} = F(\xi_{кр}) = er / a. \quad (2)$$

На рисунке 1 представлены графики, рассчитанные по данным таблиц 1 и 2 и по соотношению (2).

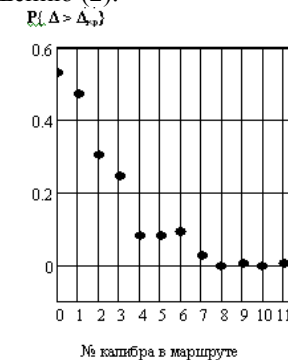


Рис.1 – Экспериментальные оценки вероятности появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника, при котором фиксируется точечный пробой: а) после изготовления провода; б) после кондиционирования в течение 48 часов

Данные, приведенные на рис.1 дали возможность оценить вероятности появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника на первых семи калибрах. А поскольку размеры дефектов поверхности меди не зависят от количества проходов через эмалировочную ванну, то по мере прохождения маршрута изменяется только относительный размер изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника

Логично полагать, что именно изменение относительного размера изоляционного слоя эмали является причиной изменения вероятности повреждения изоляции. Средний размер критического дефекта $\Delta_{кр}$ для первых семи калибров примерно одинаковый и может быть ориентировочно оценен. В сумме размер выступа на проводнике и толщина слоя эмали составляют экспериментально определяемую толщину изоляции t (разность диаметров):

$$\xi_{кр} = (t - \Delta_{кр}) / t \quad (3)$$

Экспоненциальный множитель в (1) это вероятность отсутствия повреждения эмали, а показатель степени для основания натуральных логарифмов имеет смысл среднего размера дефекта, поэтому с учетом (1), можно оценить средний размер критического дефекта поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний:

$$P\{\Delta < \Delta_{кр}\} = P\{\xi > \xi_{кр}\} = 1 - F(\xi_{кр}) = 1 - er / a = e^{-\Delta_{кр} ср / t}, \quad (4)$$

где неизвестная $\Delta_{кр} ср$ может быть оценена из экспериментальных данных для первых семи калибров

$$\Delta_{кр} ср = t \cdot [-\ln(1 - er / a)]. \quad (5)$$

На рисунке 2 приведены соответствующие оценки. Важно то, что из рис. 2 видно: во-первых, как и следовало ожидать, размеры дефектов поверхности меди мало зависят от количества проходов через эмалировочную ванну;

во-вторых, оценка размера критического дефекта поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний, находится в достаточно узком диапазоне от 2 мкм до 6 мкм и в среднем равен ориентировочно 4,5 мкм.

Эта оценка основана на том предположении, что вероятность появления точечного повреждения при испытании высоким напряжением на проход, с одной стороны, может быть экспериментально определена как отношение количества точечных повреждений на единично контрольной длине к максимальному количеству повреждений изоляции a , которое может быть зафиксировано при данных испытаниях.

С другой – может быть описана экспоненциальной функцией распределения среднего размера критического дефекта поверхности медного проводника под испытательным электродом (1).

Реальные размеры дефектов поверхности медного проводника могут быть определены визуально при микроскопическом исследовании. Результаты некоторых из таких измерений приведены в таблице при увеличении $\times 100$. Однако визуальные оценки не разграничивают критические и некритические дефекты.

Для сопоставления с расчетными оценками, условно могут быть использованы оценки максимальных размеров дефектов меди. С этой точки зрения данные рис. 2, во-первых, не противоречат экспериментальным оценкам, приведенным в таблице. И, во-вторых, свидетельствуют о том, что после прохождения первых четырех калибров маршрута характер поверхности провода изменяется.

$\Delta_{кр} ср, мм$

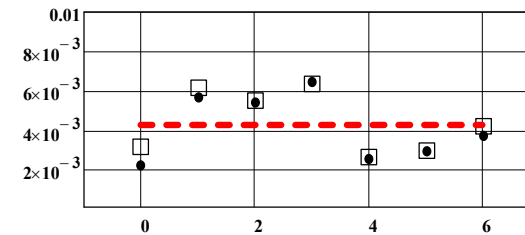


Рис. 2 – Экспериментальные оценки (см. (5)) среднего размера критического дефекта на поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний высоким напряжением на проход для первых семи калибров маршрута эмалирования провода ПЭЭИДХ – 0,63:

● – сразу после изготовления провода; □ – после кондиционирования(48 ч)

Таблица – К оценке размеров дефектов поверхности проводника

№ калибра	Дефекты типа «фраковина»			Дефекты типа «продольная бороздка»			Дефекты типа «поперечная трещинка»		Расчет по (5) Δкр ср, мм
	Парал. оси Δmax, Δmin, м	Глубина a, мм	Глубина h, мм	Парал. оси Δmax, Δmin, мм	Глубина h, мм	Ширина Δ, мм	Длина l, мм		
0	0,01	0,05	0,01	0,001	0,01	0,005	нет	нет	0,0032
1	<0,01	0,03	0,01	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	нет	нет	0,0062
2	<0,01	0,0	0,01	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	нет	нет	0,0055

		3							
3	<0,01	=> =	?	=>=	=>=	=>=	0,0005	0,02	0,0064
4	<0,01	=> =	?	=>=	=>=	=>=	0,0005	0,02	0,0027
5	<0,01	=> =	?	=>=	=>=	=>=	0,01	0,05	0,0030
6	<0,01	=> =	?	=>=	=>=	=>=	0,01	0,05	0,0042

Выводы. Экспериментальные данные, полученные по мере увеличения количества проходов через эмальагрегат, однозначно свидетельствуют о том, что зависимости напряжения пробоя от толщины эмали для готового эмальированного провода, с одной стороны, и для провода на различных участках маршрута отличаются принципиально. Это отличие обусловлено значительным отличием влияния практически неизменных неровностей медного проводника на электрическую прочность эмали с изменяющейся толщиной.

Этот вывод подтверждение достаточно сильной корреляцией между напряжением пробоя и количеством точечных пробоев на единичной контрольной длине er : $Kor(U, E) = -0,884$, где

$$Kor(U, E) = \Sigma\{[U_i - U_{cp}] \cdot [E_i - E_{cp}]\} \cdot (n \cdot \sigma[U] \cdot \sigma[E])^{-1}, \quad (6)$$

где n – количество одинаковых по номеру в ряду измерений значений переменных U и er ;

U_{cp} и er_{cp} – средние значения ряда измерений для переменных U и er ;

$\sigma[U]$ и $\sigma[er]$ – корни квадратные из дисперсий переменных, которые определены по формуле, например:

$$\sigma[U] = (D[U])^{0,5} = \{ \Sigma(U_i - U_{cp})^2 \cdot (n - 1)^{-1} \}^{0,5}$$

Список літератури: 1. Dave Harrold. Designing for Six Sigma Capability.-Control Engineering, 1999, January.-Pg.62-70. 2. Адлер Ю.П., ШнерВ.Л. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. // Методы менеджмента качества. Октябрь 2000.-С. 15 – 23. 3. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. New York, NY 10016, Copyright 1986, p.262. 4. Золотарьов В.М., Науменко О.А. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід. // КарпушенкоВ.П., Щебенюк Л.А., Антоненць Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 5.Щебенюк Л.А. Контрольна карта – інструмент якості кабельної продукції // КарпушенкоВ.П., Щебенюк Л.А., Антоненць Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 6. Методика построения контрольной карты вероятности выхода признака за нормативный предел // Вестник Харьковского государственного политехнического

университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Выпуск 127. - С. 35-38. 7. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе производства: дисс.канд. техн. наук: 05.11.13 / Голик Оксана Вячеславовна. – Х., 2009. – 219 с.

Надійшла до редколегії 01.07.2013

УДК 621.315.2

Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируемую дефектность изоляции эмальпровода / Л.А. Щебенюк, С. Ю. Антоненць // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність і ефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032) – С. 188 – 194 Бібліогр.: 7 назв.

Виконаний аналіз результатів контролю процесу виготовлення эмальпровода при високих швидкостях роботи сучасного обладнання, на якому передбачений комп'ютерний моніторинг кількості пошкоджень ізоляційного шару емалі.

Ключові слова: эмальований дріт, контроль, дефектність, полімер.

The analysis of datas of monitoring of the technological process is carried out of enamelled wire attached to high work speeds of contemporary equipment, on which a computer number monitoring foreseen of damages of isolating enamel layer.

Keywords: monitoring, enamelled wire, damage

ЗМІСТ

АРТЮХ С.Ф., ЛЮБИМОВА Н.А. Контроль и управление технологией воздухоочистки предприятий электротехнической промышленности.....	3
АРТЮХ С.Ф., ЛАЗУРЕНКО А.П., БАЙ И. А., ГОНЧАРОВА Е. Е. Рациональная главная схема электрических соединений ГЭС – залог надежной работы станции	13
БОЙКО А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей.....	20
БОНДАРЕНКО В.О., ЧЕРКАШИНА В.В., ТРЕГУБОВА О. В. Вибір пріоритетного напрямку проектування повітряних ліній 110 кВ в сучасних умовах.....	30
БОРЦОВ А.В., ПОТОВСКАЯ Е.И. Определение интенсивности солнечного излучения для наклонной принимающей поверхности	34
ВЕПРИК Ю.Н., ГАНУС О.А Параметры электрических машин в математических моделях узлов двигательной нагрузки	40
ГОЛИК О.В., УДОВЕНКО И., НАЙДЕНКО М.А. Экономические аспекты надежности кабельно-проводниковой продукции.....	47
ГУРИН А.Г., ГОНТАРЬ Ю. Г. Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозовых перенапряжений.....	53
КЕССАЄВ О.Г. Вплив на параметри передачі ексцентриситету та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів.....	62
КОСТЮКОВ И.А. Приближенная оценка радиальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля.....	70
ЛАЗУРЕНКО А.П., КРУГОЛ Н.М. Работа ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период.....	79
ЛОМОВ С.Г. Повышение электрической прочности коллектора МПТ (Часть 1).....	84
ЛИСЕНКО Л. І., КОЗЛОВА І. Ю. Підвищення ефективності теплопостачання спортивного комплексу НТУ «ХПІ»	92
ЛИСЕНКО Л. І., МАХОТИЛО К. В. КОСАТИЙ Д. М. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області.....	101
НИЖЕВСКИЙ И. В., НИЖЕВСКИЙ В. И., КРУПЕНКО А. А. Исследование распределение потенциалов на поверхности грунта у въездов (входов) и углов заземляющего контура подстанции.....	112
РУДЕВИЧ Н. В. Математична модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів... ..	117
СЕНДЕРОВИЧ Г.А. Измерение гармонических составляющих токов и напряжений в текущем режиме трехфазной электрической сети	124
ФЕДОСЕЕНКО Е.Н. Экспериментальное подтверждение варианта	

замещения вертикального электрода повышенной проводимости ...	131
ФЕДЮШКО Ю.М., МРАЧКОВСКИЙ А.Н., РАДЬКО И. П., КОХАНОВСКИЙ В. А. Нагрев и проплавление электрических контактов при коммутации.....	131
ПРИБУДКОВ П.Я., ХОМЕНКО І.В. Про магнітні параметри масивних феромагнітні тіл.....	147
ШУМИЛОВ Ю. Н. Импульсная электрическая прочность полимерных стержневых и гирлянд тарельчатых изоляторов в зоне сильных загрязнений.....	154
ШУТЕНКО О.В., АБРАМОВ В.И., БАКЛАЙ Д.Н. Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов.....	164
ЩЕРБИНА С.А. Обоснование коэффициента радиационного облучения защитной оболочки на основе фторопласта – 2М по результатам механических испытаний	181
ЩЕБЕНЮК Л.А., АНТОНЕЦ С. Ю. Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируемую дефектность изоляции эмальпровода.....	188

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 59 (1032)

Науковий редактор д-р техн. наук, проф. А. Г. Гурин,
Технічний редактор асистент Костюков І. О.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: Харків, 61002 вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра ЕІКТ.
Тел.: тел. (0572) 7076380; e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru

Обл.-вид № 53–13.

Підп. до друку 13.05.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта
видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21
