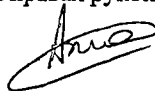


На правах рукописи



БЫСТРОВ АЛЕКСЕЙ ВАДИМОВИЧ

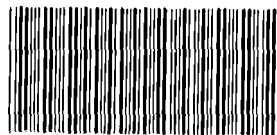
**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ
ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ ОДНОЖИЛЬНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С
ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА НАПРЯЖЕНИЕ 6-500 КВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

9 ОКТ 2014



Москва 2014

005553100

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт».

Научный руководитель: кандидат технических наук
Хевсуриани Иван Михайлович
доцент кафедры ЭПШ ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пешков Изяслав Борисович
главный научный сотрудник – председатель совет директоров ОАО «ВНИИКП»

кандидат технических наук
Роженцова Наталья Владимировна
доцент, зав. кафедрой ЭХП ФГБОУ ВПО «КГЭУ»

Ведущее предприятие: ОАО «ВНИПИнефть», г. Москва

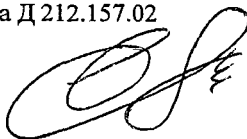
Защита состоится «21» ноября 2014 года в аудитории М-611 в 14 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 13.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан « » 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.157.02
к.т.н., доцент



Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В вопросе электроснабжения предприятий, организаций, городов важная роль отведена исследованию кабельных линий, улучшению технологий их производства, проектирования и эксплуатации.

В настоящее время в России ведется активное внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена для всех уровней среднего (6-35 кВ) и высокого (110-500 кВ) напряжений. В конструкции этих кабелей имеется металлический экран, предназначенный для отвода токов короткого замыкания в заземляющее устройство. Наибольшее распространение получили кабели одножильного исполнения. В линиях электропередачи с применением одножильных кабелей схема заземления металлических экранов влияет на пропускную способность, то есть на передаваемую мощность. Схемы соединения экранов могут быть с двухсторонним заземлением, односторонним заземлением и транспозицией экранов. При двухстороннем заземлении экранов протекание тока по экрану кабеля в нормальном рабочем режиме вызывает потери мощности, которые снижают пропускную способность кабельной линии. Исключить ток в экране можно с помощью одностороннего заземления или транспозиции экранов. Однако это требует дополнительных капиталовложений.

С решением этой проблемы сталкиваются при проектировании и эксплуатации линий с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Данный вид новой кабельной продукции не имеет широкой нормативной базы, необходимо наличие единых технологических норм и правил в электротехническом комплексе, методик по выбору систем заземления экранов.

В связи с этим разработка методики выбора системы заземления экранов для кабельных линий 6-500 кВ является актуальной.

Степень разработанности темы. Понятия о способах заземления экранов не раскрыты в отраслевых нормативных документах, имеют место лишь в стандартах отдельных организаций, рекомендуются к применению на линиях

напряжением от 110 кВ и выше, несмотря на то, что оказывают влияние и на кабели среднего напряжения.

Поэтому нельзя однозначно подходить к выбору системы заземления экранов одножильных силовых кабелей при проектировании и эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы определить однозначный критерий выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжения 6-500 кВ.

Научной задачей является разработка теоретических положений по расчету сечения токопроводящей жилы с учетом режима работы экрана и создание методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных кабелей для линий напряжением 6-500 кВ в системах электроснабжения.

Научная новизна заключается в том, что для одножильных силовых кабелей на напряжение 6-500 кВ предложена математическая модель для выбора сечения токопроводящей жилы, которая, учитывая схему соединения экранов, позволяет определить потери мощности и наведенное напряжение на экране. На основании математической модели разработана методика выбора системы заземления экранов трехфазной группы, по которой проводится экономическое сравнение. Предложен критерий выбора, определяющий относительную окупаемость «разомкнутой» системы заземления с отсутствием тока в экранах по отношению к «замкнутой», в экранах которой протекают паразитные токи.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическую значимость работы заключается в разработке математической модели и методики выбора энергоэффективной системы заземления одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Практическую значимость представляет разработанная компьютерная программа «Screen Bonding Method» для операционной системы Windows, реализованная по предложенной методике выбора системы заземления экранов. Экспериментальное применение программы было осуществлено в проекте

распределительной сети 20 кВ инновационного центра «Сколково». В настоящий момент программа внедрена в проектную деятельность ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ» и московского филиала ОАО «ЭНЕКС», получены акты внедрения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы положения из теорий электрических цепей, электрических сетей, электроснабжения и методы компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации по учету режима работы экрана при расчете сечения жилы в зависимости от системы заземления экранов.
2. Методика выбора энергоэффективной системы заземления экранов по алгоритму расчета двух вариантов исполнения кабельной линии и их экономическому сравнению.
3. Использование критерия выбора для однозначного определения системы заземления экранов.
4. Программа для ЭВМ, реализованная по разработанной методике для автоматизации процесса проектирования.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II-й всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2012» (Ижевск, 2012); трех международных молодежных научных конференциях «Тинчуриные чтения» (Казань, 2012, 2013, 2014); двух международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013, 2014); XI-й международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век» (Орел, 2013); IV-й международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2012); III-й всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных

процессов» (Тольятти, 2014); VI-й всероссийской научно-практической конференции «Системы управления электротехническими процессами» (Тула, 2012); двух всероссийских молодежных научно-практических конференциях (с международным участием) «Фёдоровские чтения» (Москва, 2012, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук. Одна работа сдана в издательство и готовится к публикации. Программа, разработанная в диссертации, получила свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 62 наименований и 4 приложений. Материал изложен на 92 страницах текста и иллюстрирован 32 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, охарактеризована ее структура, показана научная новизна работы и ее практическая ценность.

В **первой главе** проведен анализ применения кабельных линий в системах электроснабжения. Среди материалов, используемых для изоляции силовых кабелей на напряжение 6-500 кВ, лучшие изоляционные свойства имеет сшитый полиэтилен (СПЭ). Он обладает высокой электрической прочностью, меньшей диэлектрической проницаемостью, малым значением тангенса угла диэлектрических потерь, хорошей гибкостью и влагостойкостью.

В последнее время в России ведущие энергосистемы ориентированы на использование кабелей с изоляцией из СПЭ. Широкое распространение получили одножильные кабели благодаря меньшему наружному диаметру, большому строительным длинам и возможным сечениям токопроводящей жилы, а также удобству при прокладке и эксплуатации.

Кабельные линии являются одним из наиболее дорогостоящих элементов электроэнергетических систем. При их проектировании особое внимание необходимо уделять экономическим аспектам выбора параметров линии.

Основным критерием для выбора сечения этих кабелей является предельная токовая нагрузка. На пропускную способность жилы влияет схема соединения экранов.

Исследование схем соединения экранов показало, что их можно разделить на две группы: «замкнутые» с протеканием тока по экрану кабеля и «разомкнутые» при его отсутствии. Пропускная способность «разомкнутых» систем выше, но стоят они дороже. Однако, в «замкнутой» системе существуют дополнительные эксплуатационные издержки в виде оплаты потерь мощности в экранах. Таким образом, выбор сечения токопроводящей жилы должен учитывать режим заземления экрана. Для выбора между «замкнутой» и «разомкнутой» системами заземления необходимо вывести экономический критерий.

Во второй главе выбраны математические модели для расчета параметров кабелей и определения электрических параметров систем заземления. Анализ литературы показал, что этот выбор целесообразно сделать в пользу результатов, изложенных в научных работах Дмитриева М.В.

Проведено исследование возможных схем соединения экранов, выявлены положительные и отрицательные факторы, произведены расчеты токов и напряжений.

На рисунке 1 приведена схема двухстороннего заземления экранов.

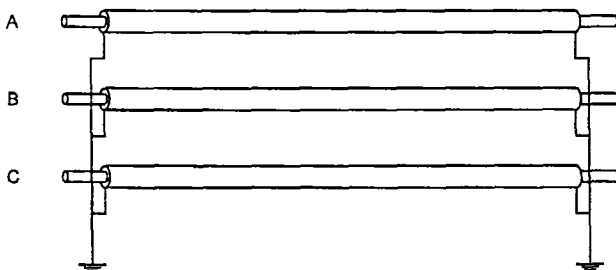


Рисунок 1 – Схема двухстороннего заземления экранов

Металлический экран должен быть присоединен к заземляющему устройству. Это проще выполнить на концах линии. Выполнение двухстороннего заземления не требует больших трудозатрат.

При заземлении экранов кабелей с двух сторон напряжение на экране отсутствует:

$$\Delta \dot{U}_{эА} = \Delta \dot{U}_{эВ} = \Delta \dot{U}_{эС} = 0 \quad (1)$$

Параметрами системы заземления являются:

Ток в экране кабеля:

$$I_э = \frac{I_ж}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_э}{X}\right)^2}}, \quad (2)$$

$$\text{где } X = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2s}{d} \right)$$

Доля потерь мощности в экране от потери мощности в жиле.

$$\frac{\Delta P_э}{\Delta P_ж} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_э}{X}\right)^2} \cdot \frac{R_э}{R_ж} \quad (3)$$

На рисунке 2 приведена схема одностороннего заземления экранов.

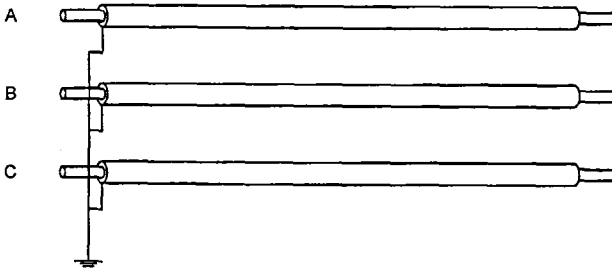


Рисунок 2 – Схема одностороннего заземления экранов

При таком режиме эксплуатации экранов необходимо учесть следующие факторы: наведенный потенциал и установку защитных аппаратов от импульсных перенапряжений на незаземленном конце экрана. Наведенный потенциал может быть опасен для обслуживающего ремонтного персонала.

Рекомендуется принимать допустимую величину наведенного на экране напряжения не более 100 В в нормальном режиме, 5 кВ – в аварийном. По требованиям электробезопасности при превышении 25 В должны быть установлены специальные концевые коробки, ограничивающие доступ к экрану кабеля.

Одностороннее заземление исключает протекания тока в экранах:

$$i_{эА} = i_{эВ} = i_{эС} = 0 \quad (4)$$

Параметрами системы заземления являются напряжения на разомкнутом конце экрана в нормальном и аварийных режимах.

Напряжения на экране кабеля при одностороннем заземлении экранов в симметричном режиме:

$$\Delta \dot{U}_э = \frac{1}{K} (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_K) \dot{I}_ж L_K, \quad (5)$$

где K – количество секций одностороннего заземления экранов.

В несимметричном режиме однофазного короткого замыкания:

$$\Delta \dot{U}_э = \frac{1}{K} \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_ж L_K \quad (6)$$

В общем виде график зависимости напряжения на экране от длины кабеля имеет линейную характеристику, поэтому максимальный потенциал будет на разомкнутом конце экрана.

На рисунке 3 приведена схема транспозиции экранов.

Транспозиция экрана выполняется таким образом, чтобы на всем протяжении кабельной линии экран проходил по трем участкам вдоль каждой из фаз, представляющих полный цикл транспозиции.

При транспозиции экранов необходимо предусмотреть появление опасных для защитной оболочки импульсных перенапряжений в узлах транспозиции и установку дополнительного оборудования: экранно-разделительных соединительных муфт, коробок транспозиции с защитными аппаратами в узлах транспозиции экранов.

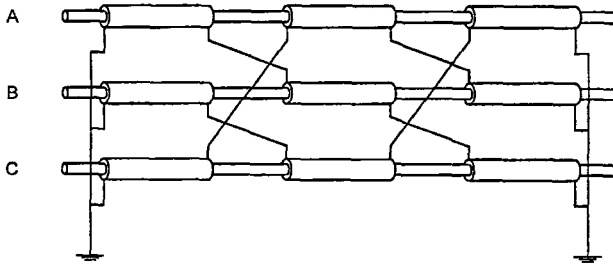


Рисунок 3 – Схема транспозиции экранов

При полном цикле транспозиции экран становится общим для всех трех фаз. На первом и третьем участках напряжение экрана относительно земли равно соответствующему наведенному потенциалу с линейной зависимостью от длины. Для среднего участка наведенный потенциал определяется ЭДС первого участка и ЭДС третьего участка, для которых определяющими являются токи разных жил. Наибольший потенциал наводится в узлах транспозиции (рисунок 4).

Транспозиция экранов является самой дорогой с точки зрения строительства, потому что требует двух соединительных муфт, возможно, колодцев транспозиции с наличием устройства заземления для установки коробок транспозиции.

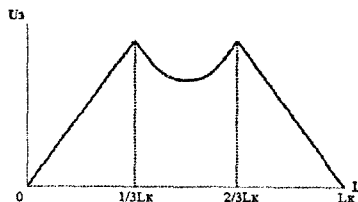


Рисунок 4 – График зависимости $U_{\Sigma}(L)$ при транспозиции экранов

Параметрами системы заземления являются напряжения в узлах транспозиции в нормальном и аварийных режимах.

Так как первый участок занимает треть длины кабельной линии, напряжение, наводимое на экране, в узле транспозиции имеет вид:

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = \frac{1}{3N} (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_{к}) \dot{I}_{ж} L_{к}, \quad (7)$$

где N – количество циклов транспозиции экранов.

В режиме однофазного короткого замыкания:

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = \frac{2}{9N} (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_{к}) \dot{I}_{жк} L_{к} \quad (8)$$

Параметры (2), (3), (5) - (8) необходимы для технического обоснования выбора системы заземления экранов.

В третьей главе разработана математическая модель для выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей.

Наличие тока в экране влияет на пропускную способность токопроводящей жилы. Сечение жилы необходимо выбирать, учитывая схему заземления экранов. Следовательно, кабельную линию при проектировании необходимо представить в двух вариантах исполнения: кабель, сечение которого учитывает протекание тока по экрану, в «замкнутой» системе и кабель, сечение которого учитывает отсутствие тока в экране, в «разомкнутой» системе.

Имея два варианта исполнения кабельной линии, можно провести их экономическое сравнение, что будет являться обоснованием выбора энергоэффективной системы заземления экранов.

Алгоритм выбора системы заземления составлен из четырех этапов. На первом этапе необходимо выбрать сечения кабелей, удовлетворяющих максимальной нагрузке линии в послеаварийном режиме и требованиям термической стойкости. Далее для выбранных сечений, характеризующих также геометрические параметры кабеля, следует провести расчеты технических

параметров систем заземления, определив токи и напряжения, возникающие при различных схемах соединения экранов. Потом выбранные системы заземления надлежит сравнить по экономическому критерию, который и определит целесообразность применения одного из вариантов исполнения кабельной линии.

Выбор кабеля зависит от трассы прокладки кабельной линии и заключается в расчете сечений токопроводящей жилы и металлического экрана. Сечения жил кабелей должны выбираться по участку трассы с худшими условиями охлаждения, если длина его составляет более 10 метров:

$$I_{дл. доп} \geq I_{макс. раб}, \quad (9)$$

где $I_{макс. раб}$ – максимальный рабочий ток линии, $I_{дл. доп}$ – длительно допустимый ток кабеля выбранного сечения.

Для расчета длительного допустимого тока по условиям прокладки, применяемым в проекте, необходимо использовать поправочные коэффициенты.

$$I_{дл. доп} = I_{0дл. доп} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n, \quad (10)$$

где $I_{0дл. доп}$ – длительно допустимый ток кабеля, приведенный в каталоге для исходных условий; $k_1 - k_n$ – поправочные коэффициенты.

Выбранное сечение токопроводящей жилы должно быть проверено по условию термической стойкости:

$$I_T \geq I_K, \quad (11)$$

где I_K – максимальный возможный ток короткого замыкания, I_T – ток термической стойкости кабеля выбранного сечения.

Сечение экрана также выбирается по условию термической стойкости. Выбор вида повреждения изоляции, при котором возникает максимальный ток короткого замыкания в экране кабеля, зависит от способа заземления нейтрали сети. В сетях с глухозаземленной нейтралью и низкоомным заземлением нейтрали – по однофазному короткому замыканию К(1). В сетях с изолированной нейтралью и высокоомным заземлением нейтрали – по двойному повреждению на землю К(1,1).

По выбранным сечениям кабелей для «замкнутой» и «разомкнутой» систем заземления экранов определяются геометрические параметры: диаметр жилы $d_{ж}$, диаметр экрана d_s и наружный диаметр $d_{нар}$.

Проверку наведенного напряжения на экране кабеля в «разомкнутой» системе необходимо производить для трех режимов работы кабельной линии: нормальный режим, трехфазное короткое замыкание в сети за кабелем, однофазное короткое замыкание в сети за кабелем, при которых ток полностью проходит по жиле и пробоя изоляции не возникает.

Изначально в качестве «разомкнутой» системы необходимо рассматривать одностороннее заземление экранов, как наиболее дешевую схему заземления с отсутствием тока в экранах. В симметричных режимах наведенное напряжение рассчитывается по выражению (5). Для нормального режима она имеет вид:

$$\Delta U_{э,н} = \frac{1}{K} X I_{норм} L_K \quad (12)$$

В режиме трехфазного короткого замыкания за кабелем:

$$\Delta U_{э}^{(3)} = \frac{1}{K} X I_K^{(3)} L_K, \quad (13)$$

где $I_{норм}$ – ток, протекающий по жиле в нормальном режиме, $I_K^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания в сети за кабелем.

В несимметричном режиме однофазного короткого замыкания за кабелем наведенное напряжение рассчитывается по выражению (6) и имеет вид:

$$\Delta U_{э}^{(1)} = \frac{1}{K} Z_{жэ} I_K^{(1)} L_K, \quad (14)$$

где $I_K^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания в сети за кабелем.

Если напряжение на экране кабеля превосходит допустимые значения для одной-двух секций одностороннего заземления, то следует применить транспозицию экранов. В симметричных режимах напряжение на экране рассчитывается по формуле (7). Для нормального режима она имеет вид:

$$\Delta U_{э,н} = \frac{1}{3N} X I_{норм} L_K \quad (15)$$

В режиме трехфазного короткого замыкания за кабелем:

$$\Delta U_9^{(3)} = \frac{1}{3N} XI_K^{(3)} L_K \quad (16)$$

В режиме однофазного короткого замыкания за кабелем по формуле (9):

$$\Delta U_9^{(1)} = \frac{2}{9N} XI_K^{(1)} L_K \quad (17)$$

Негативным фактором в системе с замкнутыми экранными контурами является протекание тока в экране. Его доля относительно тока в жиле рассчитывается по формуле (1):

$$D_I = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_2}{X}\right)^2}} \quad (18)$$

Доля потерь мощности в экране от потерь мощности в жиле рассчитывается по формуле (2):

$$D_P = D_I^2 \cdot \frac{R_2}{R_{Ж}} \quad (19)$$

При сравнении потерь мощности для двух вариантов исполнения кабельной линии, уместно говорить об общих избыточных потерях в «замкнутой» системе, учитывающих разность потерь мощности в жилах и экранах кабелей.

Обозначим потери в «замкнутой» системе индексом 1, а в «разомкнутой» – 2. Тогда, учитывая отсутствие потерь мощности в «разомкнутой» системе:

$$\Delta P_{12} = \Delta P_1 - \Delta P_2 = I_{НОРМ}^2 \cdot (R_{Ж1} (1 + D_P) - R_{Ж2}) L_K \quad (20)$$

Доля избыточных потерь к потерям в жиле составит:

$$D_{P12} = \frac{\Delta P_{12}}{\Delta P_{Ж1}} = (1 + D_P) - \frac{R_{Ж2}}{R_{Ж1}} \quad (21)$$

Очевидно, что общие избыточные потери в «замкнутой» системе равны потерям мощности в экране, если сечения жил кабелей, выбранных для двух вариантов исполнения, одинаковы, то есть $R_{Ж1} = R_{Ж2}$.

Исследование вариантов схем соединения экранов показало, что для «разомкнутых» систем характерны разовые затраты на строительство и

обустройство систем заземления, в то время как для «замкнутых» систем помимо разовых вложений неотъемлемыми являются постоянные расходы в течение всего срока службы кабельной линии. Так как стоимость строительства «разомкнутой» системы выше чем «замкнутой», справедливо полагать, что в течение срока эксплуатации кабельной линии может наступить момент, когда общие затраты в «замкнутой» системе превысят стоимость «разомкнутой». И до конца срока службы кабельной линии эта разница будет только увеличиваться.

$$CT = CI + CJ \quad (22)$$

где CT – общая стоимость, CI – цена прокладываемого кабеля, CJ – затраты на джоулевы потери в течение срока эксплуатации N лет.

Отношение момента времени T , когда общая стоимость двух вариантов исполнения кабельной линии становится одинаковой (рисунок 6), к сроку эксплуатации кабельной линии N принят в качестве критерия выбора энергоэффективной системы заземления экранов.

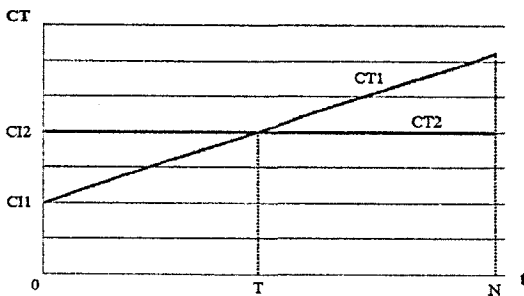


Рисунок 6 – График $CT(t)$

Значение критерия выбора определяется по выражению:

$$k_B = \frac{3 \cdot L_K (c_{K2} - c_{K1}) + K_{C32} \cdot c_{C32} + C_{доп2}}{3 \cdot \Delta P_{12} \cdot \Pi \cdot N}, \quad (23)$$

где c_K – удельная погонная цена кабеля, c_{C32} – цена устройства заземления, K_{C32} – количество устройств заземления, $C_{доп2}$ – дополнительные затраты на строительство «разомкнутой» системы заземления, Π – цена за электроэнергию.

Величина критерия выбора энергоэффективной системы заземления экранов является экономическим обоснованием для определения варианта исполнения кабельной линии. Если $k_B < 1$, то в проекте кабельной линии необходимо применить «разомкнутую» систему заземления экранов, если $k_B > 1$, то «замкнутую» систему заземления экранов.

В четвертой главе описана программа расчета, реализованная на основе метода выбора системы заземления экранов. Программа представляет собой приложение для Microsoft Windows, написанное в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования Visual Basic.

Для выбора сечения токопроводящей жилы по максимальному рабочему току по условию (9) составлена база данных кабелей, которая представляет собой книгу в формате Microsoft Excel. Для каждого сечения жилы представлены характеристики по длительно допустимым токам в зависимости от материала жилы, среды прокладки, способа прокладки, системы заземления экранов; геометрическим параметрам кабеля и его индуктивности.

По характеристикам выбранных кабелей программа производит расчет параметров систем заземления:

- для «замкнутой» по формулам (18) – (21),
- для «разомкнутой» по формулам (12) – (17), по результатам которых происходит выбор между односторонним заземлением или транспозицией, а также подсчет количества секций/циклов.

Для определения критерия выбора производится расчет момента времени T . Для его выполнения расчета пользователю необходимо внести данные об экономических характеристиках кабельной линии: цена на электроэнергию, стоимость кабелей, стоимость концевой или транспозиционной коробки, дополнительные расходы, определяемые проектировщиком в каждом конкретном проекте.

После завершения расчетов программа формирует и выдает отчет. Он представляет собой документ Microsoft Word со всеми промежуточными

расчетами, формулами и пояснениями. Генерация отчета осуществляется на основе шаблона документа, приложенного к программе.

Практическое применение методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов и программы «Screen Bonding Method» было опробовано для проекта распределительной кабельной сети 20 кВ инновационного центра «Сколково».

В программе были рассчитаны 30 питающих кабельных линий. На основании результатов расчета выбраны кабели сечением 500/35 мм² с односторонним заземлением экрана. В среднем срок окупаемости «разомкнутой» системы составил около 4 лет.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты по диссертационной работе.

В приложениях представлены свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, акты внедрения ее в проектных организациях, а также пример отчета программы с расчетом одной из линий распределительной сети 20 кВ ИЦ «Сколково».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Показано, что при проектировании кабельных линий 6-500 кВ наибольшее применение получили одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, пропускная способность которых зависит от системы заземления экранов кабелей.
2. Проведена классификация схем соединения экранов кабелей, выбраны математические модели определения параметров систем заземления экранов.
3. Разработана методика выбора энергоэффективной системы заземления экранов и сечения кабелей, которая заключается в одновременном расчете двух вариантов исполнения кабельной линии: в «замкнутой» и «разомкнутой» системах. Методика учитывает способ соединения экранов

при расчете сечения токопроводящей жилы, параметры сети, условия проектирования кабельной линии.

4. В качестве экономического критерия выбора энергоэффективной системы заземления экранов предложено использовать отношение момента времени, при котором стоимость вариантов исполнения кабельной линии одинакова, к сроку эксплуатации кабеля.
5. Реализована программа «Screen Bonding Method» в виде приложения для операционной системы Windows. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Выбор заземления экранов» №2014612060 от 17.02.2014 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Она была применена для выбора кабелей в проекте распределительной сети 20 кВ инновационного центра «Сколково» и рекомендована к внедрению проектным организациям для проведения расчетов кабельных линий на напряжение 6-500 кВ.
6. Получены акты внедрения результатов диссертационной работы в проектную деятельность ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» и московского филиала ОАО «ЭНЕКС».

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Быстров А.В. Выбор системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., II-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2012», Ижевск, 2012.
2. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Критерий выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл. том 3, VII-я международная молодежная научная конференция «Тинчуриинские чтения», Казань, 2012 - С. 155-156.
3. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Экономическое обоснование выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл. том 1,

- VIII-я международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения», Казань, 2013 - С.147-148.
4. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Алгоритм выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., IX-я международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения», Казань, 2014.
 5. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Выбор системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл. том 3, XIX-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», М., 2013 - С. 103-104.
 6. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Алгоритм выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл. том 3, XX-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», М., 2014 - С. 109.
 7. Быстров А.В. Алгоритм выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., XI-я международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век», Орел, 2013.
 8. Быстров А.В. Выбор системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., IV-я международная научно-техническая конференция «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», Тольятти, 2012 - С. 18-21.
 9. Быстров А.В. Алгоритм выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., III-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов», Тольятти, 2014.
 10. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Расчет системы заземления экранов однофазных кабелей из сшитого полиэтилена. - тез. докл., VI-я всероссийская

научно-практическая конференция «Системы управления электротехническими процессами», Тула, 2012.

11. Быстров А.В. Расчет системы заземления экранов однофазных кабелей из сшитого полиэтилена. - тез. докл., XLII-я всероссийская молодежная научно-практическая конференция (с международным участием) «Фёдоровские чтения – 2012», М., 2012 - С. 93-94.
12. Быстров А.В. Алгоритм выбора системы заземления экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. - тез. докл., XLIII-я всероссийская молодежная научно-практическая конференция (с международным участием) «Фёдоровские чтения – 2013», М., 2013 - С. 124-125.
13. Быстров А.В. Анализ систем заземления экранов однофазных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6–500 кВ // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* - 2013. - № 3. С. 9-13.
14. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Выбор сечения кабелей и системы заземления экранов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* - 2014. - № 2. С. 22-27.
15. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Выбор системы заземления экранов при расчете сечения кабелей 6-500 кВ // *Промышленная энергетика.* - 2014. - № 7.
16. Быстров А.В., Хевсуриани И.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Выбор заземления экранов" №2014612060 от 17.02.2014. Федеральная служба по интеллектуальной собственности.

Подписано в печать 12.09.2014г. Зак. 215 Тир. 100 П.л. 1,25
Полиграфический центр МЭИ
Красноказарменная ул., д. 13