

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук

Монастырского Александра Евгеньевича

на диссертацию Горобца Александра Николаевича

"Разработка метода определения теплового состояния кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена в условиях испытаний и эксплуатации", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.02 "Электротехнические материалы и изделия".

Актуальность проблемы определяется быстрым развитием кабельных сетей высших классов напряжения с использованием кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), которое наблюдается в стране в последние годы. Одним из основных факторов, определяющих надежность работы таких линий, является тепловое состояние кабеля, которое определяет пропускную способность КЛ. В современных конструкциях кабелей с СПЭ изоляцией в токопроводящую оболочку кабеля закладываются оптоволоконные модули, позволяющие с высоким разрешением определять температуру медного экрана. Однако связь между температурой экрана и токопроводящей жилы весьма сложна и неоднозначна, а тепловое состояние кабеля определяется в основном температурой токопроводящей жилы. Поэтому разработка методик расчета теплового состояния кабеля в эксплуатации является весьма актуальной и необходимой для определения режимов работы таких кабелей. Не менее необходимыми такие методики являются и при проведении типовых и предквалификационных испытаний кабелей в производстве.

Научная новизна работы определяется решением ряда сложных задач, включающих разработку математической модели и оригинальной методики оценки теплового состояния кабеля, учитывающей нелинейные зависимости теплофизических характеристик электропроводящих и изоляционных материалов от температуры. Разработано программное обеспечение для расчета теплового поля кабеля и экспериментально получены временные зависимости температуры конструктивных элементов полноразмерных образцов кабелей на напряжение 110 и 500 кВ при

циклической нагрузке. Кроме того, был разработан и создан мобильный прибор для сбора и обработки данных с внешних датчиков теплового контроля и соответствующее программное обеспечение.

Достоверность полученных результатов определяется использованными методами исследования, включающими теории тепломассообмена и электротехники, метод электротепловой аналогии, методы конечных разностей и конечных элементов, метод определения токовой нагрузки в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60287, метод теплового расчета высоковольтных кабелей при циклических и аварийных токовых нагрузках в соответствии со стандартом МЭК 60853-2-1989, компьютерное моделирование с использованием программ Mathcad, ELCUT, Сутсар, экспериментальное моделирование циклических нагрузок рабочего режима и режима перегрузки на полноразмерных образцах кабелей на напряжение 110 и 500 кВ, экспериментальная оценка теплового состояния сверхвысоковольтного кабеля на напряжение 500 кВ в условиях испытаний.

Научная и практическая значимость определяется рядом полученных результатов. Полученные математическая модель и методика с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материалов позволяют с высокой точностью и скоростью выполнять расчет теплового состояния кабеля в условиях испытаний и эксплуатации. Разработанное программное обеспечение позволяет в режиме реального времени производить расчет температурного поля кабеля на основе данных о токовой нагрузке и температуре медного экрана или оболочки кабеля. Разработанное и изготовленное оборудование позволяет во время испытаний получать данные о токовой нагрузке и температуре экрана или оболочки в автоматическом режиме, а также производить расчет теплового поля, использовать контрольно-измерительные приборы, применяемые при испытаниях, обрабатывать и хранить полученные результаты. Применение оригинальной методики и оборудование температурного контроля позволило впервые в России провести корректный эксперимент по циклическому нагреву отечественного кабеля на напряжение 500 кВ с СПЭ изоляцией в рамках типовых и предквалификационных испытаний а также выполнить анализ полученных результатов.

Основные положения, выносимые автором на защиту не вызывают сомнений, особенно значимыми представляются математический алгоритм расчета теплового поля методом конечных разностей и испытательное оборудование и результаты экспериментов, проведенных на полноразмерных образцах высоковольтных кабелей.

Структурно диссертация состоит из общей характеристики работы, основной части, состоящей из трех глав, разделенных на параграфы, заключения и списка литературы из 90 наименований. Объем диссертации составляет 135 страниц, включая 77 рисунков и 10 таблиц.

В общей характеристике работы обоснована актуальность, сформулирована цель работы, перечислены решенные задачи, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимости, методы исследования, положения выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов.

В первой главе рассмотрены существующие методы расчета теплового состояния кабельных линий высокого напряжения, проанализированы их достоинства и недостатки. Показано, что теплофизические характеристики материалов, составляющих конструкцию кабеля достаточно сильно зависят от температуры, а существующие стандартные методики не позволяют учитывать эти зависимости. Указано, что единым недостатком всех методик является невозможность учета множества влияющих внешних факторов. Рассмотрены также возможности теплового мониторинга КЛ с использованием оптоволоконных модулей, установленных в оболочке кабеля. Показано, что знание температуры оболочки не достаточно для определения температуры токопроводящей жилы, а разработанные методики ее расчета пока не имеют экспериментального подтверждения. На основе проведенного анализа определены конкретные задачи работы.

Во второй главе проводятся тепловые расчеты кабеля при циклической нагрузке с использованием методик стандартов МЭК 60287, МЭК 60853 и метода конечных элементов (МКЭ) по программе ELCUT. Показано, что область применения стандартов МЭК ограничена немногими типовыми вариантами прокладки кабеля, а использование в расчетах эмпирических коэффициентов на практике приводит к неверной оценке тепловых потерь в токопроводящей жиле. При применении МКЭ

для обеспечения необходимой точности необходимо использовать мелкую сетку конечных элементов, что существенно увеличивает требование к вычислительной технике, поэтому требуется заменять многопроволочные элементы конструкции на сплошные аналоги. Это приводит к существенным погрешностям. Автором предлагается математическая модель и методика оценки теплового состояния, разработанные на основе метода конечных разностей.

В третьей главе описываются методика и результаты экспериментальных исследований, проведенных на образцах отечественных кабелей на напряжение 110 и 500 кВ. Для проведения экспериментов был разработан и изготовлен мобильный прибор, позволяющий собирать и обрабатывать данные с внешних источников теплового контроля, а также соответствующее программное обеспечение. В результате испытаний кабеля напряжением 110 кВ при циклическом нагреве был получен график зависимости температуры токопроводящей жилы от времени и проведено сравнение его с результатами расчетов, проведенных в главе 2. Сравнение результатов показало, что наибольшее отклонение от экспериментальных результатов - порядка 40°C - получились при использовании МКЭ. Расхождение же результатов измерений с расчетами по разработанной методике не превысило $2,5^{\circ}\text{C}$. Аналогичные результаты были получены при испытании кабеля на напряжение 500 кВ. В конце третьей главы описываются результаты применения разработанной методики и оборудования при проведении типовых и предквалификационных испытаний высоковольтных кабелей с СПЭ изоляцией согласно ГОСТ Р МЭК 62067 и ГОСТ Р МЭК 60840.

В заключении подытожены основные результаты проведенных работ.

Структура работы полностью соответствует поставленным задачам, основные положения и выводы автора являются новыми логичными хорошо подтвержденными экспериментальными результатами. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Вместе с тем по работе имеются некоторые замечания.

1. При замене многопроволочной конструкции медного экрана на цилиндрическую и расчете эквивалентного коэффициента теплопроводности (формула 2.24) не учитывается, что медные проволоки имеют круглую форму и соответствен-

но теплопередача будет осуществляться в основном по воздуху. При этом расчет по формуле 2.24 даст существенно завышенный результат. Кроме того в формуле 2.23 допущена ошибка: необходимо либо убрать множители 10^{-3} , либо диаметры подставлять в метрах.

2. На рис.2.17 указывается, что задается нелинейная зависимость объемной плотности тепловыделения от температуры, а в тексте и на рисунке она линейна.

3. В формуле 2.44 в знаменателе под логарифмом должен быть радиус не токопроводящей жилы, а внутреннего полупроводящего экрана.

Указанные замечания не снижают общей ценности работы, которая в целом удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Таким образом, диссертация Горобца Александра Николаевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки метода определения теплового состояния кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена в условиях испытаний и эксплуатации, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний и существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент, к.т.н.,
ведущий инженер СПбПУ Петра Великого,
Политехническая ул.,29,С.-Петербург, 195251
+7(812)940-43-62, monalex2008@yandex.ru
29.05.2019

