



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАБЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье представлено два подхода к определению температуры кабельных линий – компьютерное моделирование тепловых процессов с учетом условий и режимов работы и непрерывный мониторинг температуры линий в режиме реального времени. Компьютерное моделирование дает возможность прогнозировать нагрев высоковольтных кабелей и отдельных участков кабельных линий в отсутствие автоматизированных систем температурного контроля.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* силовые кабели, кабельные линии, тепловые процессы, компьютерное моделирование, мониторинг температуры в режиме on-line.

Современной тенденцией в области кабельной техники является широкое применение высоковольтных и сверхвысоковольтных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) [1–3]. Для кабельных линий на основе таких кабелей совершенствуются способы сооружения и подходы к обеспечению высокого уровня надежности и экологической безопасности [1, 3].

Высоковольтные кабельные линии должны соответствовать требованиям надежности и стабильно работать в самых разных режимах и условиях. Большое значение в этом плане имеют мероприятия по обеспечению тепловой устойчивости всех элементов кабельных систем на основе информации о тепловом состоянии, нагрузочных зонах, участках локального перегрева на трассе прокладки. В силу этого на этапе предварительного исследования и оптимизации конструкции или режимов работы кабельных линий важной составной частью является тепловой анализ, который состоит в нахождении распределения температуры и зон максимального нагрева при заданном конструктивном исполнении с учетом свойств элементов, режимов и условий работы кабельной линии. Одним из немаловажных аспектов температурной стабильности является выбор взаимного расположения кабелей в линии с тем, чтобы уменьшить их тепловое влияние друг на друга.

К основным техническим характеристикам высоковольтных кабельных линий относятся тепловые характеристики, среди которых диапазон рабочих температур и максимально допустимая температура токопроводящих жил. К примеру, длительная рабочая температура сверхвысоковольтных кабелей (класс напряжения до 500 кВ) на жиле не должна превышать 90°C, а допустимая температура в режиме перегрузки составляет 130°C. Как обуславливается техническими условиями, нагрев высоковольтных кабельных систем в аварийных режимах возможен не выше 80°C в продолжение не более 8 часов в сутки [4].

Тепловое состояние элементов кабельных систем изменяется в зависимости от суточных,

сезонных, а также аварийных режимов работы. Такое условие предполагает необходимость детального изучения динамики нагрева кабельных линий и распределения температуры вдоль всей их длины, что может быть проведено как на основе компьютерного расчета температурного поля кабелей, так и с помощью мониторинга теплового состояния линий в режиме реального времени.

**Компьютерное моделирование тепловых процессов.** Моделирование и исследование тепловых процессов обусловлено требованиями практики, а именно необходимостью определения для каждого конкретного случая прокладки кабелей уточненных значений предельно допустимых токов и выявления зон локального перегрева кабелей, что непосредственно связано с надежностью их работы и длительностью срока службы.

Важной характеристикой кабельной линии является длительно допустимый ток нагрузки, который определяется по температуре токопроводящих жил. При значительном превышении уровня нагрева проводников (выше допустимого) ток нагрузки должен быть скорректирован, что важно для эффективного функционирования линии в составе энергосистемы.

В Институте электродинамики НАН Украины разработаны математические модели и компьютерные средства для моделирования тепловых процессов в кабельных линиях и окружающем пространстве при различных способах прокладки кабелей [5, 6].

Далее описаны отдельные случаи компьютерного моделирования и исследования распределения температуры в кабельных линиях.

*Двумерное моделирование* включает модели и программные средства для расчета температурного поля кабельных линий различного класса напряжения, проложенных в воздухе или земле, а также в специальных воздушных сооружениях – кабельных туннелях и каналах. Предположениями в разработанных моделях являются: неизменность условий прокладки кабелей по всей длине трассы, рассмотрение процессов в поперечном сечении кабельной линии, знание значений тока и соответственно электрических потерь в проводниках кабе-



лей – токопроводящей жиле и металлическом экране. Токи в проводниках предварительно вычисляются по методике, изложенной в [5]. Рассматриваются различные расположения кабелей в кабельных линиях – горизонтальное либо расположение кабелей треугольником. Исследуются одно- и двухцепные кабельные линии, траншейной и бестраншейной прокладки.

Разрабатываются рекомендации по предотвращению перегрева кабелей путем снижения токовой нагрузки, выбора оптимального расположения и соответствующей окружающей теплоизоляционной среды, а также использования дополнительных способов и внешних средств охлаждения; учитываются экологические аспекты и проблемы безопасности [5, 6].

1. Исследование распределения температуры в элементах силовых кабелей и в окружающем пространстве при прокладке кабельных линий в грунте или в воздухе проводится как в стационарном, так и нестационарном режимах нагрева с учетом нелинейных электро- и теплофизических свойств материалов кабелей и засыпчного грунта. Возможен расчет температуры кабелей при допустимой токовой нагрузке и в условиях кратковременных перегрузок по току. Результаты компьютерных расчетов приведены на Рис. 1.

2. Исследование распределения температуры и неизотермического свободно-конвективного движения воздуха в кабельных воздушных сооружениях, а также определение температуры жил кабелей с целью уточненного выбора токовых нагрузок (Рис. 2). Отметим, что движение воздуха в воздушных сооружениях вызывается нагревом кабелей и разностью плотностей, что является результатом теплопереноса. Эффективность свободно-конвективной циркуляции воздуха зависит от геометрии кабелей, их расположения и

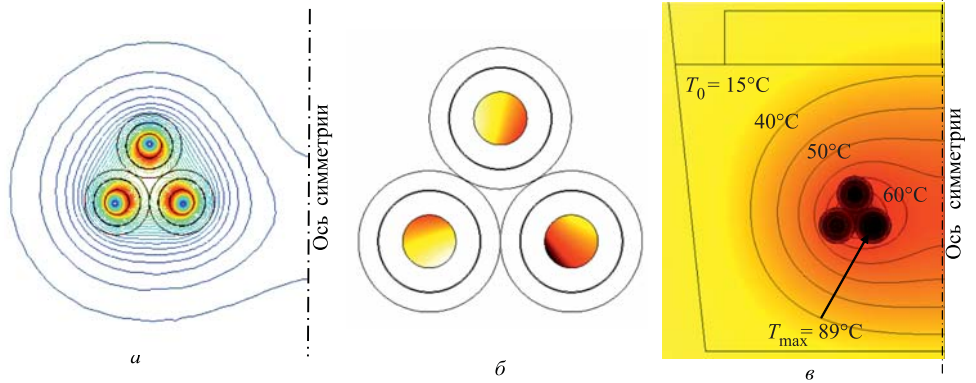


Рис. 1. Характерные распределения (в цвете и изолиниями) магнитной индукции (а), плотности тока (б) и температуры (в) для кабелей одной цепи двухцепной линии. Вторая кабельная линия находится симметрично отмеченной оси симметрии.

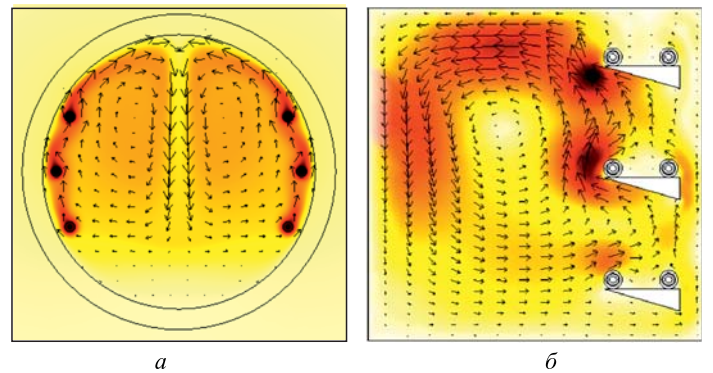


Рис. 2. Характерное распределение температуры (в цвете) и теплового потока (стрелками) внутри туннеля с кабелями (а). Поле скоростей воздуха в кабельном канале (б).

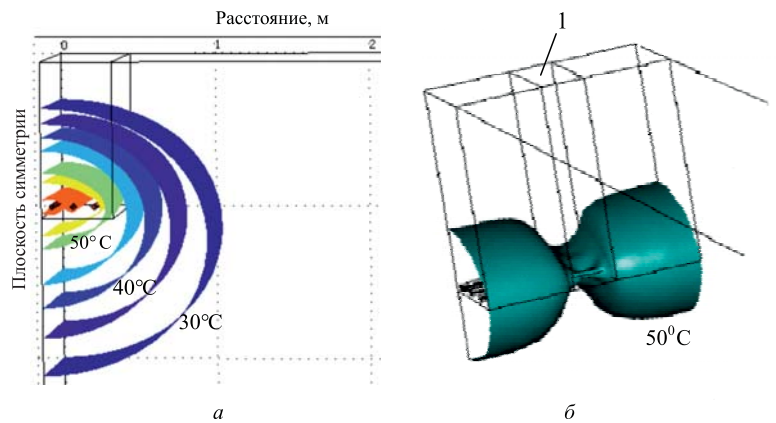


Рис. 3. Распределение температуры вокруг кабельной линии в виде изотермических поверхностей (а). Изотермическая поверхность температуры 50°C в случае неоднородного грунта с участком 1, имеющем более высокую теплопроводность (б).

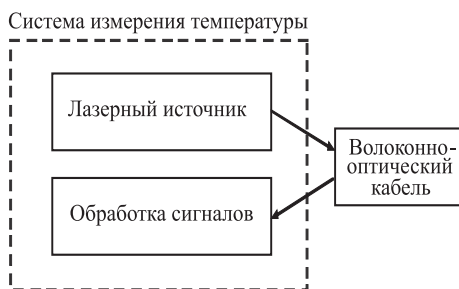


Рис. 4. Схематическое представление волоконно-оптической системы мониторинга температуры кабеля.

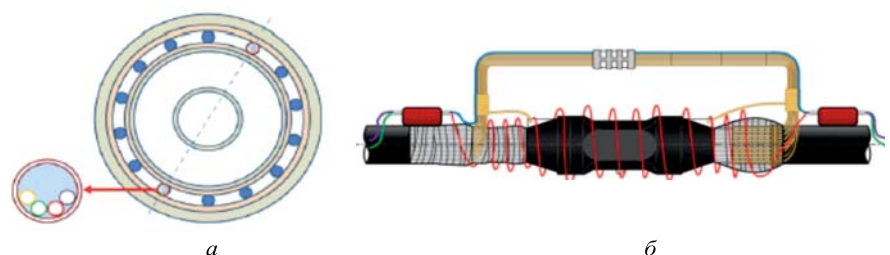


Рис. 5. Поперечное сечение композитного силового кабеля с оптическим волокном (а); гибкий волоконно-оптический кабель, обвитый вокруг соединительной кабельной муфты (б) [7].

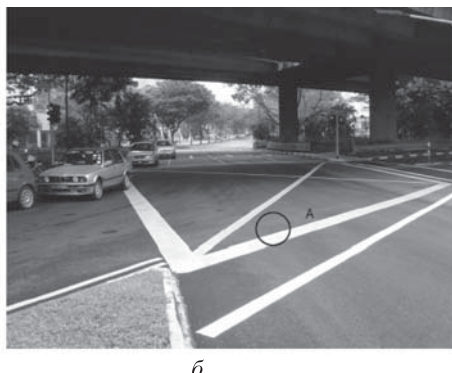


Рис. 6. Температура вдоль высоковольтного кабеля, измеренная волоконно-оптической системой непрерывного температурного контроля (а). А, В, С, D – горячие точки на участке кабельной линии длиной более 11,4 км. Точка А соответствует локальной зоне кабеля, расположенного на глубине 5 м под бетонной дорогой (б) [9].

конфигурации сооружения, а также температуры окружающей среды. Поле скоростей воздуха и поле температуры в воздушных сооружениях тесно связаны между собой.

Трехмерное моделирование осуществляется, например, с целью получения пространственного распределения температуры в объеме, содержащем кабельные линии, и в окружающей среде, в том числе в объеме грунта, имеющем участки с неоднородными тепловыми характеристиками по длине кабельной линии подземной прокладки (Рис. 3).

#### Мониторинг температуры в режиме on-line.

Контроль температуры кабельной линии в режиме реального времени позволяет более рационально использовать кабельные электросети при различных условиях и режимах работы, а также дает возможность управлять нагрузкой линии без превышения допустимой температуры, ограничивающейся свойствами изоляции, что исключает выход кабеля из строя. Кроме того, с помощью информации об изменении температуры во времени и вдоль кабельной линии возможно прогнозирование остаточного ресурса изоляции, а значит и всей линии, а также обеспечение длительного срока ее эксплуатации.

В отношении энергосети, в составе которой работает кабельная линия, отслеживание ее температурного режима необходимо для снижения частоты перебоев в электроснабжении, оперативной реакции на возникновение зон перегрева и предотвращения аварийных ситуаций.

Основными элементами современных систем температурного мониторинга кабельных электросетей являются волоконно-оптические кабели (Рис. 4). С целью организации температурного контроля кабельной линии оптоволоконный датчик, как правило, интегрируются в структуру экрана кабеля на этапе изготовления. На Рис. 5, а показан такой комбинированный кабель. Четыре оптических волокна встроены в трубку из нержавеющей стали, расположенную между проволок металлического экрана кабеля [7].

Для измерения температуры вдоль всей протяженности кабельной линии волоконно-оптический кабель специальным образом прокладывается также в местах расположения соединительных муфт (Рис. 5, б).

Современные системы непрерывного температурного контроля кабельных линий, их применение и положительный опыт работы описаны, например, в статьях [8–10] (Рис. 6).

Большим достоинством систем температурного контроля является не только оценка температурного режима силовых кабелей, но и точная локализация зон кабелей с повышенным нагревом, а также возможность корректировки токовой нагрузки кабельной линии и управление ее работой на основе данных мониторинга.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А.К., Шерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
2. Кучерявая И.Н. Сверхвысоковольтные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена // Гідроенергетика України. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
3. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины // Электрические сети и системы. – 2009. – № 3. – С. 16–21.
4. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. Том 3, М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с; Том 4, М.: Папирус-Про, 2005, 640 с.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев, Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
6. Кучерявая И.Н. Электромагнитные поля и процессы в неоднородных диэлектрических и проводящих средах (многомасштабное моделирование). Диссертация на соискание уч. степени докт. техн. наук, Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014, 390 с.
7. Cho J., Kim J.H., Lee H.J., Kim J.Yo., Song I.K., Choi J.H. Development and improvement of an intelligent cable monitoring system for underground distribution networks using distributed temperature sensing. *Energies*, 2014, No. 7, p. 1076–1094.
8. Мокански В. Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем. *Кабели и провода*, № 2 (315), 2009, с. 14–17.
9. Su Q., Li H.J., Tan K.C. Hotspot location and mitigation for underground power cables. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 6, November 2005, p. 934–938.
10. Grund R., Hohloch J., Rogers R., Kammler A., Pohl C., Roland H. Integral sensing of HV cable joints – monitor operation and predict failures early. *JICABLE'19*, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables, Paris – Versailles, France, 23–27 June, 2019, 6 p.