

5. При подаче на систему автоматизации управляющего воздействия выполняется его моделирование на алгоритмическом или логическом уровнях [4], а полученные выходные сигналы интерпретируются как события, сообщения о которых передаются соответствующим исполнительным механизмам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров А. А. Об одном подходе к моделированию логической структуры управляющих устройств // Информатизация образовательных процессов: Автоматизация управления, технологии, дистанционное обучение / Под ред. А. Цырельчука: В 2 ч. – Мн.: Изд-во МГВРК, 2001. – Ч. 1. – 11 с.

2. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М., 1978.

3. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. – М.: Высш. шк., 2001.

4. Акунович С. И., Гончаров А. А., Поплавский В. С. Объектно-событийное моделирование алгоритмов управления и исполнительных механизмов технологического оборудования // Образовательные технологии в подготовке специалистов: В 5 ч. – Мн.: Изд-во МГВРК, 2003. – Ч. 4. – 7 с.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов БНТУ

Поступила 22.02.2006

УДК 621.311

### **О ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗКАХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

**Канд. техн. наук, доц. РАДЖЕВИЧ В. Н., асп. РОМАНОВ Р. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Трехфазная линия электропередачи может быть выполнена одним трехжильным кабелем или тремя одножильными кабелями. Применение трехжильных кабелей снижает стоимость сооружения линии. Поэтому одножильные кабели с бумажной изоляцией, несмотря на их большую пропускную способность, не получили широкого распространения в системах электроснабжения напряжением 6–10 кВ. В какой-то мере этому способствовала и недостаточная информация по одножильным кабелям в нормативно-технической литературе.

Появление на рынке электротехнической продукции одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) существенно повлияло на конструктивное исполнение кабельных линий. Одножильные кабели напряжением 6–10 кВ с изоляцией из СПЭ по пропускной способности превосходят аналогичные кабели с бумажной изоляцией [1]. При прокладке в земле или воздухе одножильные кабели могут располагаться в одной плоскости с расстоянием между кабелями «в свету», равном наружному диаметру кабеля  $d$ , или треугольником (рис. 1).

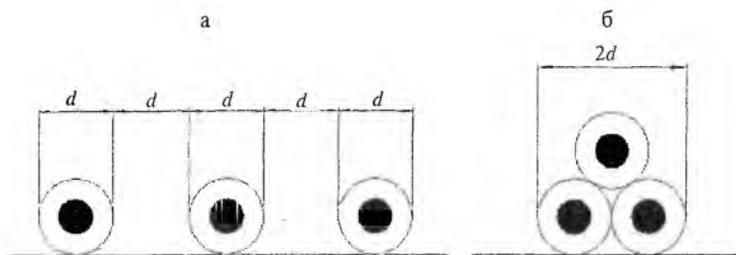


Рис. 1. Расположение одножильных кабелей при прокладке:  
а – в плоскости; б – треугольником

При размещении кабелей в одной плоскости индуктивное сопротивление жил примерно в 1,6 раза больше, чем при расположении треугольником. В многоамперных установках (ток 1000 А и более) из-за отрицательных проявлений эффектов близости и индуктивного переноса мощности более благоприятным является симметричное расположение кабелей. Кроме того, расположение в плоскости требует большего объема земляных работ при прокладке в траншеях, а при прокладке на эстакадах и в кабельных сооружениях – отдельного крепления каждого кабеля к несущим конструкциям. В силу указанных причин на практике, как правило, применяется расположение одножильных кабелей треугольником.

В общем случае допустимый длительный ток кабеля зависит от ряда факторов [2]

$$I_{\text{доп}} = f(n, \theta_{\text{ж}}, \theta_{\text{с}}, \tau, S, R, P_{\text{и}}), \quad (1)$$

где  $n$  – количество жил в кабеле, шт;  $\theta_{\text{ж}}$  – допустимая температура нагрева жилы кабеля при продолжительной нагрузке, °С;  $\theta_{\text{с}}$  – температура окружающей среды, °С;  $S$  – суммарное тепловое сопротивление кабеля и окружающей среды, град·см/Вт;  $R$  – электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля, Ом;  $P_{\text{и}}$  – мощность, рассеиваемая в изоляции кабеля за счет диэлектрических потерь, Вт.

Уменьшение  $n$ ,  $\theta_{\text{с}}$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $R$  и  $P_{\text{и}}$ , а также увеличение  $\theta_{\text{ж}}$  способствует повышению  $I_{\text{доп}}$ . При одинаковом числе жил из одного и того же проводникового материала величина  $I_{\text{доп}}$  главным образом зависит от значений  $\theta_{\text{ж}}$ ,  $S$  и  $R$ . Следовательно, кабели напряжением 6–10 кВ с изоляцией из СПЭ, имеющие  $\theta_{\text{ж}} = 90$  °С, при идентичных условиях прокладки допускают большие токи нагрузки по сравнению с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией, у которых  $\theta_{\text{ж}} = 65$  °С при напряжении 6 кВ и  $\theta_{\text{ж}} = 60$  °С при напряжении 10 кВ [3].

При прокладке в воздухе величина  $S$  складывается из тепловых сопротивлений кабеля и его поверхности, а при прокладке в земле – из тепловых сопротивлений кабеля, защитных покровов и почвы, окружающей кабель [2]. Тепловое сопротивление кабеля зависит в основном от его геометрических размеров и конструктивных особенностей, а также от удельного теплового сопротивления материалов, из которых изготовлен кабель. Геометрические размеры одножильных кабелей напряжением 6–10 кВ с изоляцией из СПЭ и с изоляцией из пропитанной бумаги с одинаковым сечением жил различаются незначительно. Так, кабель с изоляцией из СПЭ сечением

жилы  $300 \text{ мм}^2$  в пластмассовой оболочке имеет наружный диаметр  $40,9 \text{ мм}$ , а аналогичный кабель с бумажной изоляцией в свинцовой оболочке –  $41 \text{ мм}$ . Однако меньшее удельное тепловое сопротивление полиэтилена ( $300\text{--}400 \text{ град}\cdot\text{см}/\text{Вт}$ ), по сравнению с сопротивлением пропитанной вязкими составами бумаги ( $600\text{--}700 \text{ град}\cdot\text{см}/\text{Вт}$ ), обеспечивает лучшую теплопроводность полимерной изоляции и оболочки кабеля, что благоприятно сказывается на его пропускной способности. Отметим, что с ростом температуры нагрева жилы имеет место некоторое снижение удельного теплового сопротивления изоляционного материала [2]. Это способствует увеличению допустимого тока кабеля.

Длительно допустимые токовые нагрузки проводников могут определяться на основе теплового расчета или экспериментально. Для изолированных проводников расчетные формулы получаются сложными, требующими большого количества исходных данных, которые часто носят неопределенный характер. Поэтому в справочной информации по кабельной продукции приводятся допустимые токи кабелей, полученные на основе расчета и уточненные экспериментально с учетом применяемой изоляции, площади сечения жил, условий прокладки и допустимых температур нагрева жил и окружающей среды.

Таблицы допустимых токов для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией регламентированы действующими правилами устройства электроустановок [3] и являются общегосударственными нормами. Для кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением  $6 \text{ кВ}$  и более как одножильных, так и трехжильных допустимые токи в действующей нормативно-технической литературе отсутствуют. В связи с этим при выполнении расчетов электрических сетей используется информация о технических характеристиках кабелей, предоставляемая производителями кабельной продукции. Отметим, что информация различных фирм о допустимых токах кабелей с одинаковым сечением жил при идентичных условиях прокладки может существенно различаться и даже быть противоречивой. Так, по данным фирмы АВВ при напряжении  $6\text{--}10 \text{ кВ}$  большей пропускной способностью обладают кабели, расположенные в плоскости, в то время как по информации фирмы Nexans – треугольником. Необходимо также отметить, что сырье для изготовления основной изоляции и оболочки (полиэтилен) всеми производителями кабелей с изоляцией из СПЭ закупается у одного производителя и кабели выпускаются на однотипном оборудовании.

Особенностью одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением  $6\text{--}10 \text{ кВ}$  является то, что они имеют большую пропускную способность при прокладке в воздухе, а не в земле, в то время как допустимые токи для трехжильных кабелей с бумажной изоляцией, прокладываемых в земле, примерно на  $30 \%$  выше, чем для кабелей равных сечений жил, прокладываемых в воздухе.

Пропускная способность линий электропередачи, потери мощности и электроэнергии, а также другие показатели электрической сети зависят от плотности тока в проводниках, определяемой по выражению

$$j = I / q, \quad (2)$$

где  $I$  – ток линии, А;  $q$  – площадь сечения токопроводящей жилы,  $\text{мм}^2$ .

Приняв  $I = I_{\text{доп}}$ , для линии электропередачи по (2) можно определить длительно допустимую по нагреву плотность тока  $j_{\text{доп}}$ . Для различных проводников, в том числе и для кабелей с пластмассовой изоляцией действующими правилами устройства электроустановок [2] регламентированы значения экономической плотности тока  $j_{\text{э}}$ , устанавливающие оптимальные соотношения между расходом цветного металла и потерями электроэнергии в линии.

Произведем сравнительный анализ допустимых плотностей тока для кабелей с изоляцией из СПЭ при различных видах прокладки. Чтобы математически выразить существующую зависимость плотности тока от сечения жилы кабеля, необходимо методом наименьших квадратов произвести сглаживание (выравнивание) имеющихся значений  $j_{\text{доп}}$  [4]. В соответствии с этим методом сумма квадратов отклонений найденных значений допустимой плотности тока  $j_{\text{доп}}$  от сглаживающей кривой  $\bar{j}_{\text{доп}} = f(q_i, a, b, c, \dots)$  должна быть минимальной

$$\sum_{i=1}^n [j_{\text{доп}} - f(q_i, a, b, c, \dots)]^2 = \min, \quad (3)$$

где  $j_{\text{доп}}$ ,  $q_i$  – допустимая плотность тока и площадь поперечного сечения жилы  $i$ -го кабеля;  $a, b, c$  – неизвестные параметры, которые определяются при аппроксимации;  $n$  – число экспериментальных точек.

При аппроксимации плотности тока могут рассматриваться разные функции: линейная, степенная, показательная, параболическая и т. д. Предпочтительной является функция с минимальным значением среднего квадрата ошибки

$$\sigma^2 = 1/n \sum_{i=1}^n [j_{\text{доп}} - f(q_i, a, b, c, \dots)]^2. \quad (4)$$

Произведенные расчеты показали, что для аппроксимации допустимых плотностей тока в зависимости от площади сечений жил кабеля наиболее подходит степенная функция вида

$$\bar{j}_{\text{доп}} = aq^{-b}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета аппроксимирующих функций для допустимых плотностей тока кабелей напряжением 6–10 кВ с изоляцией из СПЭ, прокладываемых в земле при  $\theta_c = 15^\circ\text{C}$  и в воздухе при  $\theta_c = 25^\circ\text{C}$ . Аппроксимация осуществлялась на основе данных одножильных кабелей с площадью сечения жил 50–800 мм<sup>2</sup> производителей кабельной продукции России и трехжильных кабелей с площадью сечения жил 25–240 мм<sup>2</sup> фирмы Draka (Швеция). Для одножильных кабелей плотности тока определены при температуре жилы 90 °С, а трехжильных – при 65 °С (в соответствии с информацией, представленной производителями кабельной продукции).

Параметры сглаживающих функций для допустимых плотностей тока кабелей с изоляцией из СПЭ

Кабель	Вид		Параметры функции		$\sigma$ , А/мм <sup>2</sup>
	прокладки	расположения	$a$	$b$	
Три одножильных кабеля с алюминиевыми жилами	В земле	Треугольником	21,7	0,465	0,03
	В земле	В плоскости	19,96	0,439	0,04
	В воздухе	Треугольником	17,05	0,384	0,03
	В воздухе	В плоскости	23,13	0,411	0,04
Три одножильных кабеля с медными жилами	В земле	Треугольником	30,31	0,483	0,07
	В земле	В плоскости	27,74	0,454	0,04
	В воздухе	Треугольником	24,75	0,409	0,05
	В воздухе	В плоскости	36,4	0,457	0,11
Трехжильный кабель с алюминиевыми жилами	В земле	—	17,58	0,461	0,11
	В воздухе	—	13,74	0,421	0,03

Точечная оценка, т. е. аппроксимированное (сглаженное) значение плотности тока  $j_{\text{доп}}$ , может несколько отличаться от оцениваемого параметра  $j_{\text{доп}}$ . Поэтому при небольших объемах выборки следует осуществлять интервальную оценку, т. е. определять диапазон  $j_{\text{доп}} \pm \beta\sigma$ , покрывающий оцениваемый параметр. Здесь  $\beta$  – принятая в зависимости от доверительной вероятности кратность меры расстояния. При  $\beta = 3$  экспериментальные точки с вероятностью 0,997 (при нормальном законе распределения) попадают в диапазон  $j_{\text{доп}} \pm 3\sigma$  [4].

На рис. 2 и 3 показаны графические зависимости плотности тока от площади сечения токоведущей жилы, рассчитанные по сглаживающей функции (5) с учетом данных табл. 1, для кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из СПЭ при различных видах прокладки. Там же в виде горизонтальных линий показаны значения экономической плотности тока для кабелей с пластмассовой изоляцией, принятые в соответствии с [3] в зависимости от значений времени использования максимальной нагрузки  $T_{\text{max}}$ , характеризующей плотность графика нагрузки линии.

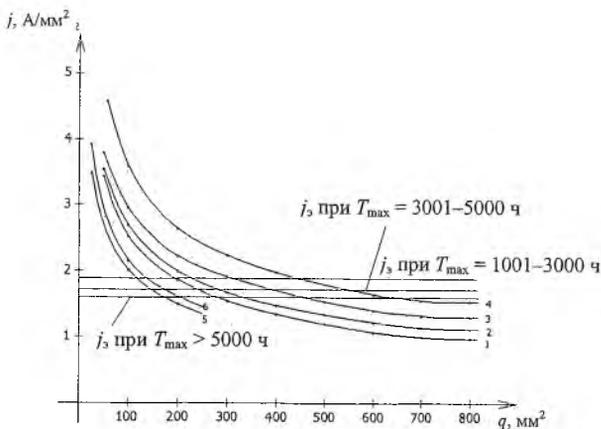


Рис. 2. Зависимость допустимой плотности тока от площади сечения жилы для кабелей с алюминиевыми жилами: 1 – при прокладке в земле одножильных кабелей треугольником; 2 – то же в плоскости; 3 – при прокладке в воздухе одножильных кабелей треугольником; 4 – то же в плоскости; 5 – трехжильный кабель, проложенный в земле, при  $\theta_* = 65^\circ\text{C}$ ; 6 – трехжильный кабель, проложенный в воздухе, при  $\theta_* = 65^\circ\text{C}$

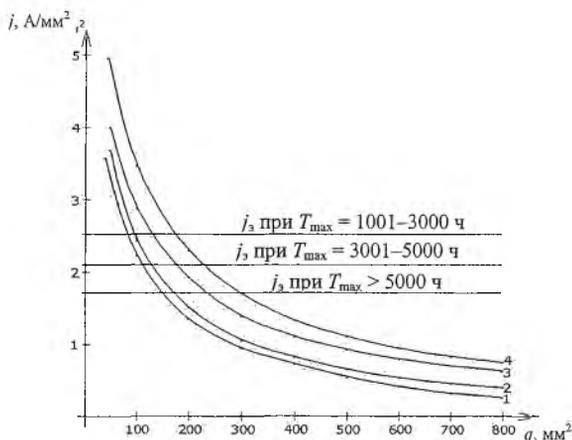


Рис. 3. Зависимость допустимой плотности тока от площади сечения жилы для кабелей с медными жилами: 1 – при прокладке в земле одножильных кабелей треугольником; 2 – то же в плоскости; 3 – при прокладке в воздухе одножильных кабелей треугольником; 4 – то же в плоскости

Полученные зависимости показывают, что для кабелей с изоляцией из СПЭ при всех видах прокладки лишь в области малых сечений проводников имеет место нормальное соотношение:  $j_{\text{доп}} \geq j_s$ . Для больших сечений при определенных значениях тока нагрузки и  $T_{\text{max}}$  может оказаться, что  $j_{\text{доп}} < j_s$ . Такое соотношение плотностей тока практически неосуществимо и свидетельствует о невозможности использования нормированных значений экономических плотностей тока, установленных для кабелей с пластмассовой изоляцией. Следовательно, экономически целесообразные плотности тока для таких кабелей должны определяться на основе технико-экономических расчетов.

## ВЫВОДЫ

1. Получены сглаживающие степенные функции для оценки длительно допустимых по нагреву плотностей тока одно- и трехжильных кабелей напряжением 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена для различных видов прокладки и расположения одножильных кабелей.

2. В области больших сечений жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при любых видах прокладки длительно допустимые плотности тока могут быть меньше экономических значений, регламентированных действующими правилами устройства электроустановок. Вследствие этого, выбор экономически целесообразных сечений жил этих кабелей следует производить на основе технико-экономических расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Радкевич В. Н., Романов Р. В. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и их основные характеристики // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 6. – С. 40–43.
2. Бачелис Д. С., Белорусов Н. И., Саакян А. Е. Электрические кабели, провода и шнуры: Справ. – М.: Энергия, 1971. – 704 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1968. – 512 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 4.07.2005