

# Импульсный

## НИЗКОИНДУКТИВНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ КАБЕЛЬ

**Высоковольтные кабели с большой токовой пропускной способностью широко применяются в различных энергетических установках. Наиболее часто такие кабели используются в качестве соединительных. В настоящее время на рынке кабельной продукции можно приобрести различного типа соединительные кабели (КВНС–20/75, КИВМ–10, КВИС–25, КВПГ–100 и т. д.), но новые технические требования и новые области применения, с учетом развития технологической базы, измерительной техники и методов проектирования, а также появления современных диэлектрических материалов, позволяют решать задачи разработки импульсных кабелей нового поколения. Необходимость сочетания требований к толщине изоляции с требованиями к величине поперечного сечения проводника, которое обеспечивало бы максимальную токовую нагрузку, при условии минимального значения величины погонной индуктивности является особенностью конструирования этого типа кабелей.**

Григорий Грешняков  
Евгений Нарышкин

niikabel@yandex.ru

### Введение

В данной статье обсуждается решение задачи разработки импульсного низкоиндуктивного высоковольтного сильноточного кабеля (далее по тексту — НК), предназначенного для подключения энергопоглощающих резисторов к оперативным и защитным устройствам коммутации тока в системе вывода энергии из сверхпроводящих обмоток международного реактора ИТЭР (Франция). НК может использоваться в других импульсных системах для соединения нагрузок с источниками питания, например с емкостными накопителями энергии, с максимальным импульсным напряжением до 24 кВ.

### Описание и обоснование конструкции

Кабель имеет коаксиальную конструкцию, что обусловлено необходимостью обеспечения минимального взаимного влияния внешнего и внутреннего электромагнитного поля кабеля. Внутренний проводник выполняется в виде медной токопроводящей жилы сечением 400 мм<sup>2</sup> (рис. 1). Жила изготовлена многопроволочной, круглой формы, уплотненной, из медных проволок марки ММ диаметром 3,06 мм. Номинальный диаметр жилы — 23,5 мм. Изолирование жилы проводится композицией из силанольносшитого полиэтилена LE 4421M (95%) и катализатора LE 4431 (5%) производства компании Borealis. Толщина слоя изоляции — 5 мм. По жиле и по изоляции накладывается экран из электропроводящей композиции полиэтилена LE 0540 компании Borealis.

Внешний проводник сечением 400 мм<sup>2</sup> выполняется в виде двух повивов из медных проволок диа-

метром 2,25 мм с разным направлением скрутки. Каждый повив скрепляется медной лентой.

Промежуточная и наружная оболочки изготавливаются из полимерной композиции, не содержащей галогенов, марки CONGuard S фирмы Condor (плотность 1,55 г/см<sup>3</sup>). Внешний номинальный диаметр кабеля — 55,4 мм.

Индуктивность не превышает 0,2 мкГн/м. Для обеспечения необходимой токовой нагрузки следует использовать параллельное соединение 2–4 кабелей (количество подлежит уточнению).

### Обоснование выбора материалов

Выбор мягкой меди в качестве материала для токопроводящей жилы обусловлен низким значением ее удельного электрического сопротивления в сочетании с достаточной механической прочностью и гибкостью. В качестве материала изоляции выбран силанольносшитый полиэтилен, обладающий высокой электрической прочностью, терморезистивными свойствами в сочетании с химической стойкостью, стойкостью к радиоактивному излучению, морозостойкостью, низкими газопроницаемостью и влагопоглощением. Силановая технология отличается более низкими капитальными и производственными затратами, гибкостью производственного процесса. На этапе наложения изоляции не требуется высокого давления. При производстве могут быть использованы полиэтилены любой плотности [4]. Новейшие силановые смеси содержат специальные добавки, которые существенно улучшают характеристики изоляционного материала. В качестве материала для промежуточной и внешней оболочек применен современный, высокотехнологичный, не содержащий

галогенов композиционный материал марки CONGuard S 6645 фирмы Condor.

**Расчеты основных параметров**

**Расчет индуктивности**

Величину поперечного сечения проводников кабеля необходимо выбирать с учетом обеспечения максимальной токовой нагрузки. В соответствии с техническими требованиями существуют два режима работы кабеля:

- периодические импульсы тока с периодом повторения  $\geq 20$  мин,
- одиночные (редкие) импульсы тока.

Форма импульсов в обоих режимах — экспонента с постоянной времени от 5 до 15 с. Максимальная амплитуда импульсов в периодическом режиме — 15 кА, в одиночном — 25 кА (в дальнейшем подлежит уточнению).

С целью обеспечения минимальной индуктивности кабель должен состоять из нескольких параллельно включенных кабелей. Каждый кабель имеет коаксиальную конструкцию с поперечным сечением внутреннего и внешнего проводников, равным 400 мм<sup>2</sup> (рис. 1).

По предварительным данным заказчика, максимальная амплитуда импульса тока

составляет 25 кА. В первом приближении процессы, происходящие в нестационарном режиме работы НК, описываются дифференциальным уравнением 55:

$$\gamma(dT/dt)C_p = \rho J^2,$$

где  $C_p = 91,3$  кал/(кг·град) — удельная теплоемкость меди при постоянном давлении,  $\gamma = 8,89 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — удельная плотность меди,  $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6}$  Ом·м — удельное сопротивление меди,  $T$  — температура (К),  $t$  — время (с),  $J$  — плотность тока (А/мм<sup>2</sup>).

Площадь поперечного сечения токопроводящей жилы можно оценить, учитывая, что  $J = I/S$ , где  $I$  — действующее значение тока:

$$S = [(P\rho)/(C_p \times \gamma \times (dT/dt))]^{1/2}.$$

Подстановка в последнее выражение численных значений, учитывая, что  $I \sim 12,5$  кА и  $dT/dt \sim 230/45 = 5,1$ , дает оценку величины суммарного поперечного сечения:  $S = 840$  мм<sup>2</sup>. Таким образом, при выборе сечения одного кабеля, равного 400 мм<sup>2</sup>, для обеспечения максимальной токовой нагрузки следует использовать 2–3 кабеля, соединенные параллельно.

Индуктивность коаксиального кабеля [2] состоит из внутренней индуктивности проводников  $L_r$  и  $L_R$  и внешней (межпроводниковой) индуктивности  $L_{мп}$ :

$$L = L_{мп} + L_r + L_R. \quad (1)$$

Для внешней индуктивности коаксиального кабеля (мкГн/м) справедливо соотношение [1]:

$$L_{мп} = (\mu_0/2\pi) \times \ln(R/r) = 0,2 \ln(R/r). \quad (2)$$

Внутренняя индуктивность проводников:

$$L_r + L_R = \mu/(2\sqrt{2}\pi rk) + \mu/(2\sqrt{2}\pi Rk), \quad (3)$$

где  $k = \sqrt{\mu\gamma\omega}$ .

При любой частоте для кабеля с малой толщиной внешнего проводника справедливо соотношение:

$$L = 0,2 \ln(R/r) + 13,33(r + R)/(2Rr\sqrt{f}), \quad (4)$$

где  $r$  и  $R$  — радиусы проводников (мм),  $f$  — частота (Гц).

Из последнего выражения видно, что, например, для области высоких частот при вычислении индуктивности можно не учитывать внутреннюю индуктивность проводников (ее вклад <1%), то есть

$$L = 0,2 \ln(R/r). \quad (5)$$

Для учета низкочастотных составляющих спектра импульса тока при вычислении индуктивности [1] достаточно добавить еще одно слагаемое:

$$L = (\mu_0/2\pi) \ln(R/r) + \mu_0/8\pi. \quad (6)$$

Учитывая, что  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, и переходя к практическим единицам, в пересчете на единицу длины получим:

$$L = 0,2 \ln(R/r) + 0,05. \quad (7)$$

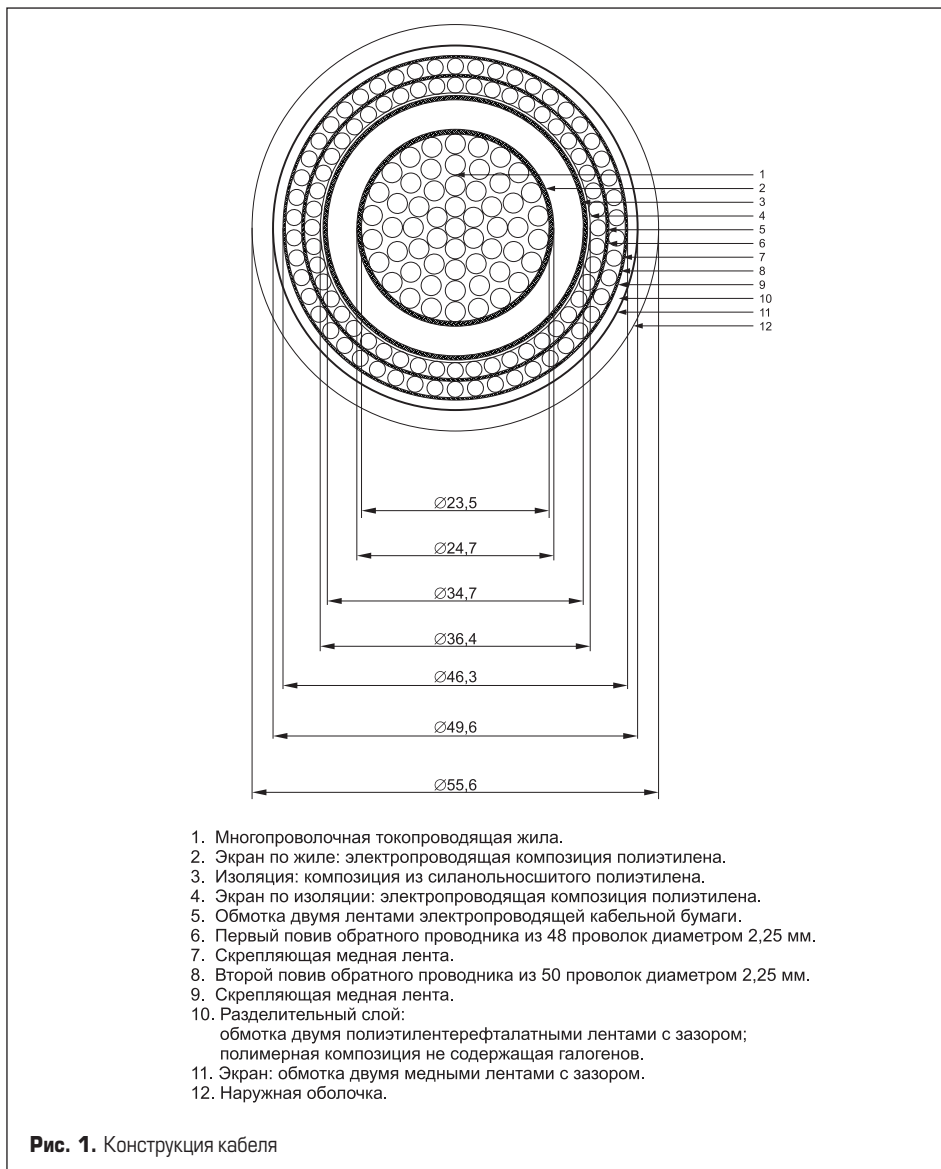
Используя последнее выражение, можно оценить индуктивность кабеля со следующими геометрическими характеристиками (рис. 1):

- Радиус уплотненной многопроволочной жилы с поперечным сечением 400 мм<sup>2</sup>  $r = 11,75$  мм.
- Толщина изоляции, включая два экрана из полупроводящего полиэтилена,  $\Delta = 6,2$  мм.

С учетом дополнительного экрана из проводящей кабельной бумаги толщиной 0,24 мм радиус внешнего проводника  $R = 20,45$  мм. Таким образом, индуктивность кабеля составляет:

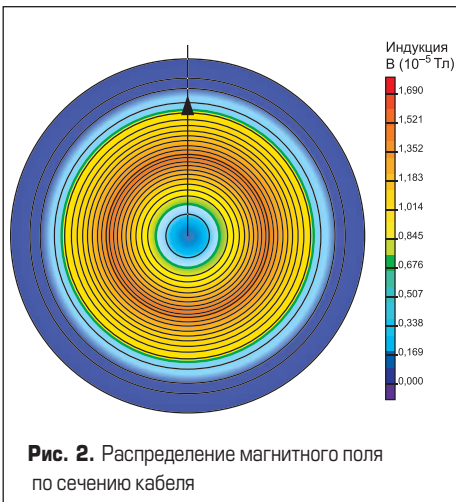
$$L = 0,2 \ln(R/r) + 0,05 = 0,2 \ln(20,45/11,75) + 0,05 = 0,16. \quad (8)$$

Использование выражения (4) для уточнения параметра, с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к несколько большему значению величины индуктивности  $L$  по сравнению с оценкой (8).

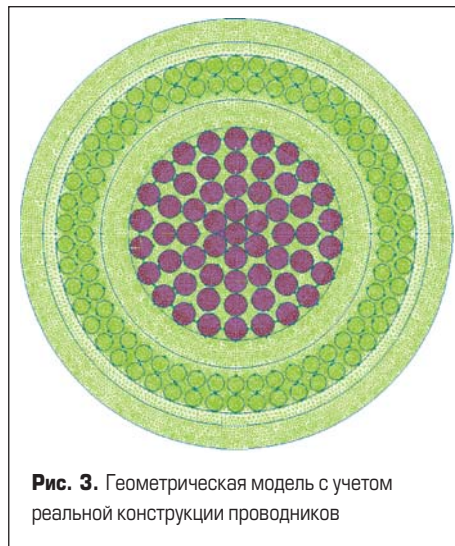


1. Многопроволочная токопроводящая жила.
2. Экран по жиле: электропроводящая композиция полиэтилена.
3. Изоляция: композиция из силанольноноситого полиэтилена.
4. Экран по изоляции: электропроводящая композиция полиэтилена.
5. Обмотка двумя лентами электропроводящей кабельной бумаги.
6. Первый повив обратного проводника из 48 проволок диаметром 2,25 мм.
7. Скрепляющая медная лента.
8. Второй повив обратного проводника из 50 проволок диаметром 2,25 мм.
9. Скрепляющая медная лента.
10. Разделительный слой: обмотка двумя полиэтиленерефталатными лентами с зазором; полимерная композиция не содержащая галогенов.
11. Экран: обмотка двумя медными лентами с зазором.
12. Наружная оболочка.

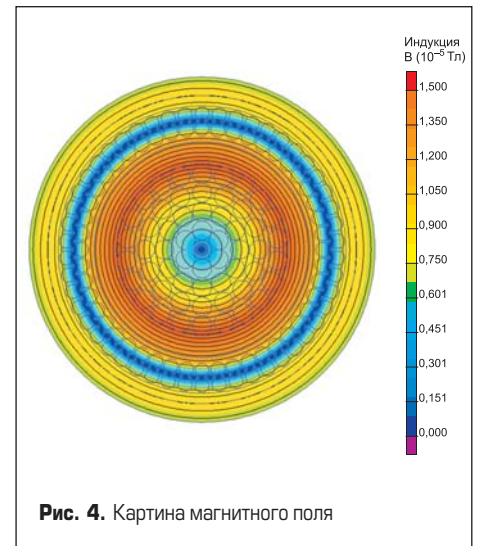
Рис. 1. Конструкция кабеля



**Рис. 2.** Распределение магнитного поля по сечению кабеля



**Рис. 3.** Геометрическая модель с учетом реальной конструкции проводников



**Рис. 4.** Картина магнитного поля

**Расчет индуктивности с использованием пакета прикладных программ ELCUT**

На первом этапе индуктивность двухпроводной коаксиальной линии рассчитывается с рядом упрощающих предположений:

1. Расчет ведется без учета вихревых токов в экранах и эффекта вытеснения тока в основных проводниках (эффект близости).

**Таблица 1.** Параметры многопроводной модели

Проводник	Диаметр проволоки, мм	Число витков по слоям
Центральная жила	3,06	1-6-12-16-22
Обратный проводник	2,25	Первый повив — 48 Второй повив — 50

**Таблица 2.** Результаты расчета индуктивности на разных частотах

Частота $f$ , Гц	Индуктивность через потокоцепление $L$ , мкГн/м	Индуктивность через энергию поля $L_2$ , мкГн/м
50	0,126	0,126
100	0,123	0,123
150	0,120	0,118
200	0,116	0,114
250	0,113	0,111
300	0,110	0,108
350	0,107	0,105
400	0,105	0,103
450	0,103	0,102
500	0,102	0,100
550	0,101	0,099
600	0,099	0,098
650	0,098	0,097
700	0,097	0,096
750	0,096	0,095
800	0,095	0,094
850	0,095	0,093
900	0,094	0,092
950	0,093	0,092
1000	0,092	0,091
1050	0,092	0,090
1100	0,091	0,090
1150	0,090	0,089
1200	0,090	0,089
1250	0,089	0,088
1300	0,089	0,088

2. Не учитывается, что внутренняя жила и повивы обратного провода состоят из отдельных проводников круглого сечения. Принимается, что внутренний проводник имеет форму сплошного цилиндра, а внешний — полого цилиндра.
3. Относительная магнитная проницаемость всех элементов кабеля принимается равной единице.

В этих предположениях задача становится элементарной. Пусть ток в прямом проводе равен 1 А, в обратном проводе — -1 А, магнитное поле рассчитывается в предположении, что оно сосредоточено внутри кабеля (рис. 2).

Для вычисления индуктивности теперь нужно найти магнитный поток между внутренним и внешним контуром. В ELCUT [6] для этого удобно применить «мастер» индуктивностей.

Результат расчета: индуктивность на 1 м погонной длины —  $L = 0,1553$  мкГн/м.

Альтернативный подход к вычислению индуктивности состоит в вычислении энергии магнитного поля по всему сечению кабеля, затем индуктивность вычисляется как удвоенная энергия, деленная на квадрат тока. Энергетический подход дает значение индуктивности  $L = 0,1553$  мкГн/м. Дальнейшее уточнение могло бы последовательно исключать допущения 1–3.

**Расчет индуктивности с учетом конструкции проводников**

Для уточнения величины индуктивности построена модель, учитывающая структуру центральной жилы и обратного проводника. Соответствующие параметры этой модели представлены в таблице 1.

Геометрическая модель имеет вид, представленный на рис. 3.

Красным цветом выделены проводники центральной жилы.

Уточненное значение индуктивности двухпроводной линии имеет значение  $L = 0,164$  мкГн/м.

Картина магнитного поля показана на рис. 4.

**Расчет индуктивности в зависимости от частоты тока**

При питании кабеля переменным током возникает эффект близости и поверхностный эффект, в результате которого распределение

тока по сечению проводников нельзя более считать равномерным. Искажение картины распределения токов по сечению проводников вызывает изменение распределения магнитного поля и магнитного потока, сцепленного с каждым из проводников.

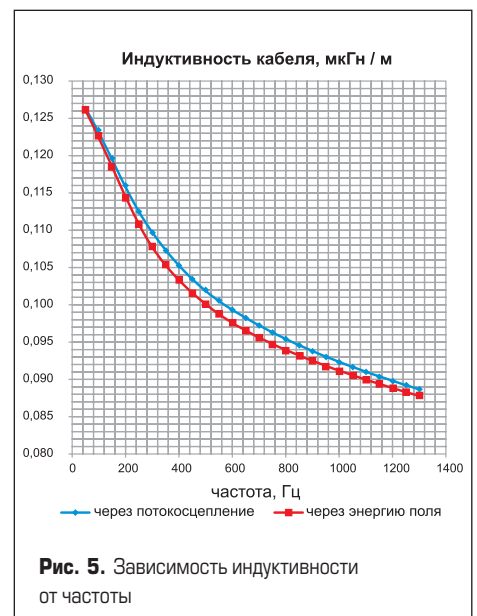
Степень проявления эффекта близости и поверхностного эффекта нарастает с увеличением частоты тока, так что можно ожидать зависимости индуктивности двухпроводной линии  $L$  от частоты  $f$ . Для изучения зависимости  $L(f)$  решена серия задач расчета магнитного поля переменных токов на разных частотах. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

График, иллюстрирующий зависимость значения индуктивности кабеля от частоты, представлен на рис. 5.

Приведенные в этом разделе оценки и расчеты показывают, что величина погонной индуктивности НК не превышает значения 0,2 мкГн/м.

**Расчет максимальной температуры проводника в режиме одиночных импульсов**

Тепловой расчет кабеля сводится к расчету изменения температуры проводников от времени. По рекомендациям СИГРЭ [3].



**Рис. 5.** Зависимость индуктивности от частоты

для расчета переходных режимов нагрева кабелей с достаточной степенью точности может быть применен метод сосредоточенных теплоемкостей.

Рекомендуемый метод заключается в следующем. Рассматривается случай внезапного увеличения тока в жиле. Кабель и окружающая среда разбиваются на зоны, которые представляются в виде электрической схемы замещения, показанной на рис. 6, где  $P_{к1} - P_{кn}$  — тепловыделение в рассматриваемых зонах кабеля,  $S_{к1} - S_{кn}$  — термическое сопротивление зон кабеля,  $C_{к1} - C_{кn}$  — теплоемкость зон кабеля,  $S_{01} - S_{0m}$  — термическое сопротивление зон, окружающих кабель,  $C_{01} - C_{0m}$  — теплоемкость зон окружающей среды.

Схема замещения, показанная на рис. 6, учитывает, что в кабеле выделено  $n$  зон, а в окружающей среде —  $m$  зон. Для вычисления значения температуры в кабеле при коротких временных отрезках ( $10 \text{ мин} < \tau < 1 \text{ ч}$ ) необходимо увеличить количество зон в изоляции кабеля.

Как показали вычисления [3], в изоляции достаточно выделить две зоны с равным термическим сопротивлением. В этом случае граница между зонами (рис. 6) будет иметь радиус  $r_x = \sqrt{Rr_0}$ , а изоляцию можно представить в виде схемы, представленной на рис. 7, где  $p$  — коэффициент Ван-Вормера [3], который для каждой части разделенной изоляции определяется из условия, что общее количество теплоты, поглощаемое или отдаваемое изоляцией, остается неизменным:

$$p = 1/\ln(R/r_0) - 1/((R/r_0) - 1). \quad (9)$$

Теплоемкость первого и второго слоя изоляции вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} C_{из1} &= C_{из} \times \pi r_0 \times (R - r_0); \\ C_{из2} &= C_{из} \times \pi R \times (R - r_0), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $C_{из}$  — удельная объемная теплоемкость изоляции.

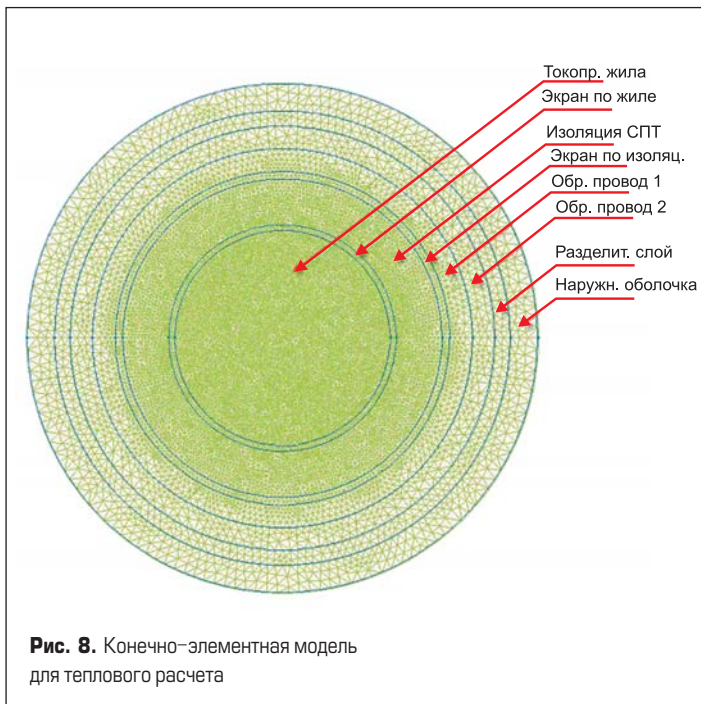


Рис. 8. Конечно-элементная модель для теплового расчета

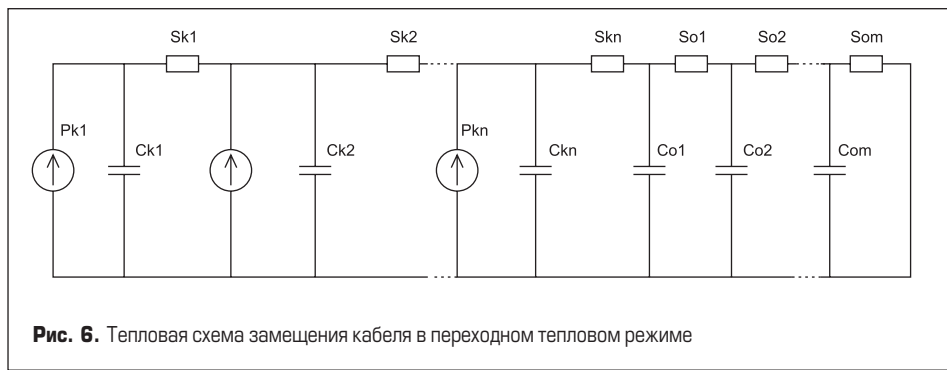


Рис. 6. Тепловая схема замещения кабеля в переходном тепловом режиме

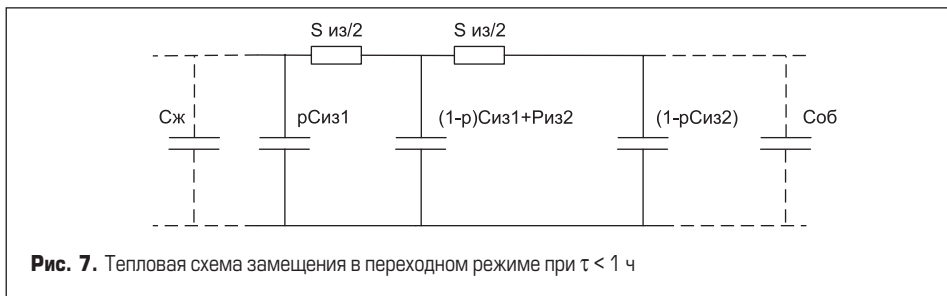


Рис. 7. Тепловая схема замещения в переходном режиме при  $\tau < 1 \text{ ч}$

Таблица 3. Тепловые свойства материалов

Метка	Материал	Теплопроводность (Вт/(м <sup>2</sup> град))	Теплоемкость (Дж/(кг град))	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )
Токопроводящая жила	Многопроволочная медь	380×Коеф. заполнения = 0,75	385×Коеф. заполнения = 0,75	8960
Экран по жиле	Электропроводящий полиэтилен	0,2	3000	1600
Изоляция СПЭ	Силанольношнитый полиэтилен	При 50 °С — 0,289; при 100 °С — 0,248	При 20 °С — 2300; при 80 °С — 3760	948
Экран по изоляции	Электропроводящий полиэтилен	0,2	3000	1600
Обратный провод 1	48 медных проволок d = 2,25 мм	380×Коеф. заполнения = 0,7	385×Коеф. заполнения	8960
Обратный провод 2	50 медных проволок d = 2,25 мм	380×Коеф. заполнения = 0,65	385×Коеф. заполнения	8960
Разделительный слой	Компаунд	0,2	3000	1600
Наружная оболочка	Компаунд	0,2	3000	1600

Изложенную методику расчета можно применить к кабелям различных конструкций. Расчет полной схемы замещения производится численными методами, в частности с использованием пакета прикладных программ ELCUT [6]. Конечно-элементная модель НК с указанной

степенью триангуляции расчетной области для решения уравнения теплопроводности представлена на рис. 8.

Тепловые свойства материалов, используемых при изготовлении НК, представлены в таблице 3.

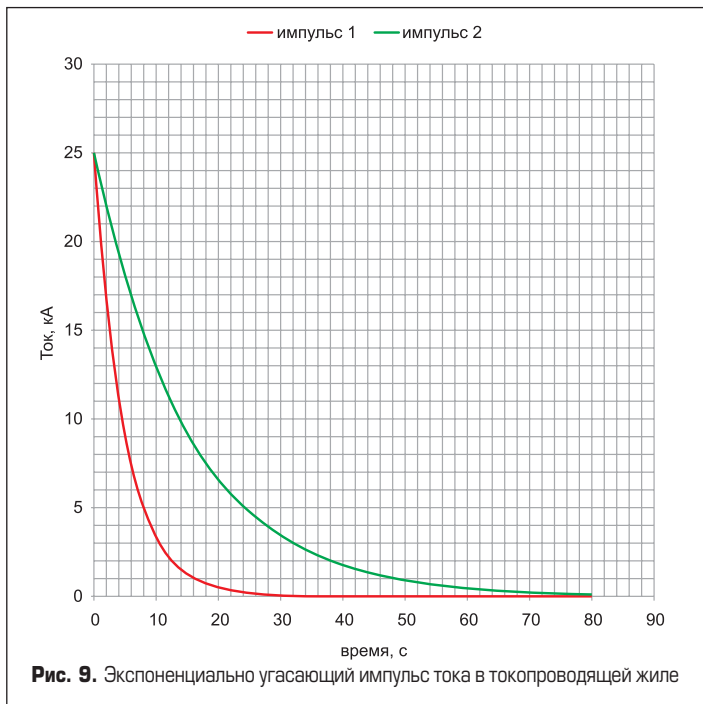
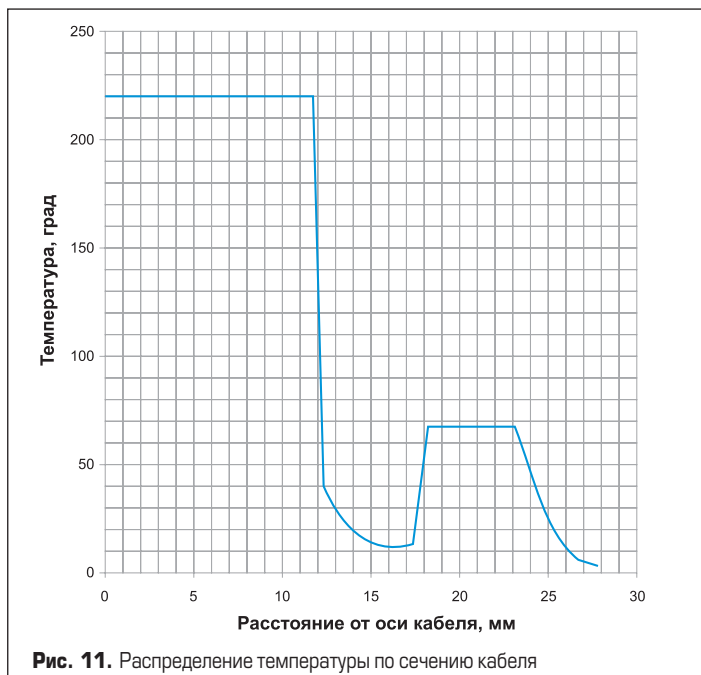
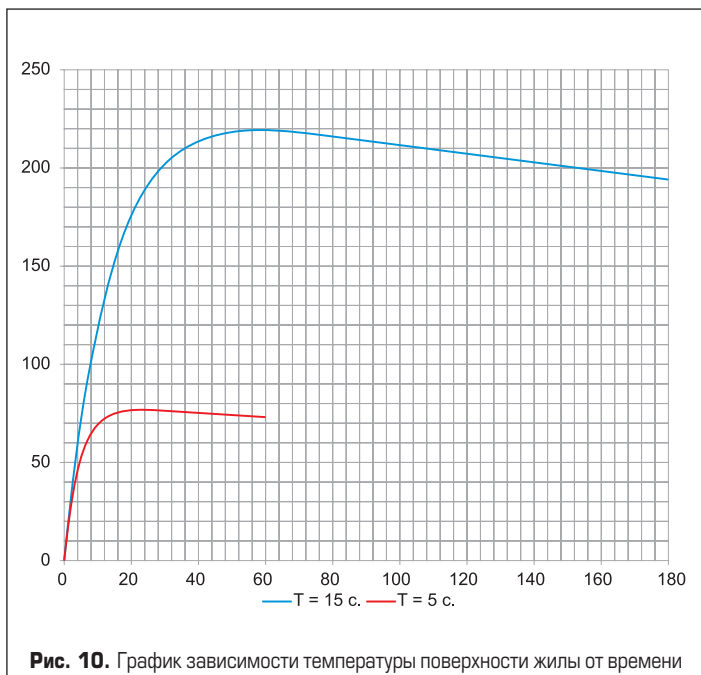


Рис. 9. Экспоненциально угасающий импульс тока в токопроводящей жиле



Для вычисления объемной плотности мощности тепловыделения ( $Вт/мм^3$ ) используется удельное электрическое сопротивление меди (в первом приближении — при комнатной температуре) и геометрические данные о площади сечения прямого и обратного проводника.

На рис. 11 показано распределение температуры по сечению кабеля при воздействии импульса тока с постоянной времени 15 с в момент времени  $t = 60$  с, соответствующий наибольшей температуре центральной жилы  $T = 220$  °C.

Наличие или отсутствие источника тепла в обратном проводнике практически не сказывается на максимальном значении температуры центральной жилы, то есть нагрев обратного проводника оказывается незначительным и не сказывается существенно на характере теплопереноса от центральной жилы к периферии кабеля. При параллельном соедине-

нии токовая нагрузка на каждый включенный кабель снижается. На рис. 12 представлены температурные кривые при снижении токовой нагрузки в два и в четыре раза. Рассматриваемые кривые построены при условии отдельной прокладки каждого НК в воздухе.

Приведенные в этом разделе оценки и расчеты показывают, что температура токоведущей жилы кабеля в режиме передачи одиночного импульса тока с амплитудой 25 кА не превышает 220 °C. Предельно допустимая температура сшитого полиэтилена, которым изолирована жила, составляет величину 250 °C (в режиме короткого замыкания). Однако, как было отмечено выше, в реальных условиях должно быть использовано параллельное соединение двух или более кабелей. При параллельном соединении двух кабелей максимальная температура жилы не превышает 55 °C,

при максимальной длительно допустимой температуре 90 °C для сшитого полиэтилена.

**Закключение**

При решении задачи проектирования импульсного низкоиндуктивного высоковольтного силовоточного кабеля была разработана конструкция и расчетным путем определены основные характеристические параметры кабеля. Испытания макета кабеля подтвердили полное соответствие его основных характеристик результатам расчета и техническим требованиям. Полученные результаты явились следствием учета и анализа многих факторов. Учень и правильно оценить влияние этих факторов удалось благодаря использованию при расчетах специализированного пакета прикладных программ ELCUT, который является мощным инструментом для решения задач теории поля и связанных прикладных задач.

В дальнейшем, с целью оптимизации конструкции, авторы планируют решение нелинейных тепловых и электромагнитных задач, а также задач по упругости, механическим напряжениям и деформации. Все расчеты будут проводиться с использованием ELCUT.

**Литература**

1. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергоатомиздат», 1986.
2. Белоруссов Н. И., Гроднев И. И. Радиочастотные кабели. М.: Энергия, 1973.
3. Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М., «Энергоатомиздат», 1996.
4. Макиенко Г. П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии. Пермь, Агентство «Стиль-МГ», 2004.
5. Эберт Г. Краткий справочник по физике. М., Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.
6. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1.

