

В настоящее время большинство компаний, производящих кабели и проектирующих кабельные трассы, выполняют тепловой расчет, используя метод конечных элементов.

В отличие от этого метода, аналитические методы расчета не отражают реальные свойства конструкций, – считают авторы статьи.

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

### От калькулятора к производным

Переход от аналитических методов к численным – нормальная тенденция развития во многих областях знания, в том числе и в электротехнике. Нужно отметить, что усложнение расчета всегда ведет к усложнению применяемого программного обеспечения (ПО), а также к необходимости использовать труд инженеров более высокой квалификации. Очевидно, что без объективных предпосылок такая тенденция на рынке возникнуть не могла.

#### НЕДОСТАТКИ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДИК

Рассмотрим недостатки аналитических методов на примере. Обратимся к работе [1], в которой предложена методика теплового расчета кабельных линий (КЛ). В статье приведены схемы размещения КЛ. Попробуем сформулировать их отличия от реальных конструкций:

1. КЛ согласно [1] расположена в трубе осесимметрично, тогда как на практике лежит в ней. Вследствие этого теплопередача от КЛ в грунт осуществляется не только через воздушный зазор, но и при непосредственном контакте стенки трубы и КЛ. При этом толщина воздушного зазора не является постоянной по сечению трубы величиной.
2. В [1] не учтено наличие поверхности грунта, которая влияет на конфигурацию теплового поля.
3. Предложение учитывать наличие трех однофазных КЛ путем увеличения теплового сопротивления грунта в 3 раза основано на предположении, что картина теплового поля симметрична относительно оси КЛ, что с учетом п. 2 не совсем верно.

Кроме того, есть еще две характерные для теплового расчета проблемы, которые не могут быть решены при использовании методики [1], что делает ее фактически неприменимой на практике:

- при разработке конфигурации трасс КЛ в крупных городах (для которых применение КЛ особо актуально) зачастую определяющими могут быть не столько участки, на которых КЛ прокладывается в трубах, сколько участки пересечения

с трассами трубопроводов горячего водоснабжения. В этом случае можно ожидать больших ошибок в определении температуры КЛ при применении аналитического метода; – при любом способе соединения экрана в нем присутствуют вихревые токи и выделяется тепло. Таким образом, соотношение тепловых потерь  $P_s / P_{ж} = 0$ , приведенное в [1], не верно, что показано в [2].

Далее мы попытаемся показать влияние на результаты теплового расчета параметров и явлений, не учитываемых в [1]. Все расчеты, приведенные ниже, были выполнены по методу конечных элементов.

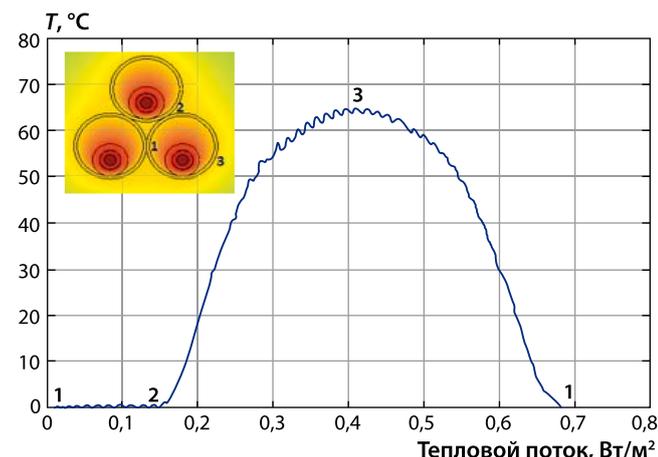
#### О МЕТОДЕ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ КЛ ОДНОФАЗНОЙ

В [1] предполагается, что группа из трех однофазных КЛ эквивалентна однофазной КЛ, теплового сопротивление грунта для которой увеличено в три раза. Такое допущение соответствует трехкратному уменьшению поверхности КЛ, с которой происходит теплоотдача в грунт.

Тепловое поле трехфазной системы однофазных кабелей в трубах, а также распределение теплового потока  $\Phi$  по периметру сечения трубы представлены на рис. 1. Видно, что при прокладке кабелей треугольником поток в зоне сопряжения кабелей (участок 1–2) вообще отсутствует, а по оставшейся части периметра сечения распределен неравномерно с максимумом в точке 3. Таким образом, тепловой поток снимается как минимум с 2/3 поверхности кабеля. Вообще же доля теплоотводящей поверхности будет определяться в каждом конкретном случае размерами и взаимным расположением фаз. Это обстоятельство полностью игнорируется методикой [1].

Для снижения вихревых токов в экранах в [1] рекомендуется располагать фазы линии по возможности ближе друг к другу (не случайно популярным является расположение фаз треугольником) [3]. При этом тепловые поля фаз существенно влияют друг на друга.

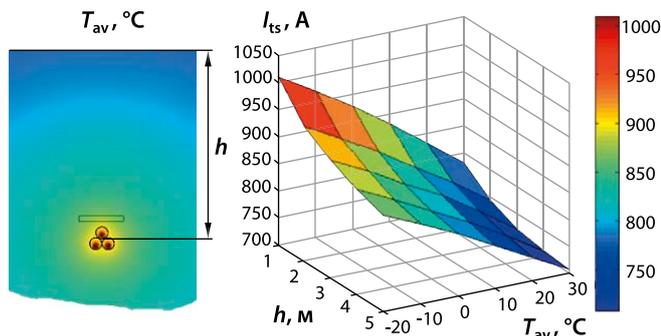
• Рис. 1. Распределение теплового потока по периметру сечения трубы (точки 1, 2, 3)



• Рис. 2. Зависимость разности температуры жилы КЛ и грунта вдали от КЛ от тока жилы



**Рис. 3** Влияние глубины прокладки ( $h$ ) и температуры воздуха над поверхностью грунта ( $T_{ав}$ ) на величину длительного тока термической стойкости  $I_{ts}$



В частности, в модельной задаче для уединенного кабеля с внешним диаметром 64 мм при прокладке в грунте с теплопроводностью 0,83 К·м/Вт погонное тепловое сопротивление составит  $R_{г} = 2,5$  К·м/Вт. При сборке трех таких кабелей в треугольник аналогичный расчет методом конечных элементов дает  $R_{гт} = 1,57$  К·м/Вт, что в расчете на одну фазу дает  $R_{г} = 4,71$  К·м/Вт. Согласно же [1] мы должны были бы получить  $R_{г} = 3 \cdot 2,5 = 7,5$  К·м/Вт, что в полтора раза больше. Ясно, что применение аналитических выражений [1] может привести к весьма далекой от реальности оценке теплового режима.

Средняя температура в сечении кабельной линии рассчитывается по формуле  $T = T_0 + R_{г} \cdot \Phi$ , где поперечный тепловой поток с единицы длины КЛ  $\Phi = I^2 \cdot R'$  ( $I$  – ток,  $R'$  – электрическое сопротивление 1 м кабеля) определяет повышение температуры КЛ относительно окружающего грунта ( $T_0$  – температура грунта на удалении от КЛ).

Для приведенного примера на рис. 2 построены зависимости средней температуры в сечении КЛ согласно подходу [1] (зависимость 1) и при расчете теплового сопротивления методом конечных элементов (зависимость 2).

Как видно, приближение, использованное в [1], не является обоснованным.

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА СРЕД ГРУНТ–ВОЗДУХ**

Проанализируем предельно допустимый ток термической стойкости для КЛ, выполненной однофазными кабелями с транспонированными экранами и сечением токоведущей жилы 1000 мм<sup>2</sup> в пластиковых трубах (рис. 3). Указанный ток термической стойкости определялся по допустимой температуре установившегося симметричного режима КЛ, принятой равной 100 °С. В качестве параметров, определяющих тепловой режим КЛ, варьировались глубина прокладки  $h$  и температура воздуха над поверхностью грунта  $T_{ав}$ .

Из результатов видно, что как внешние условия, так и геометрические характеристики сечения трассы КЛ способны существенно повлиять на предельные режимы КЛ. Поэтому, применяя упрощенные модели, не учитывающие рассмотренные в этом примере обстоятельства, можно получить заниженную оценку пропускной способности КЛ.

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТРАСС**

Тепловое поле в слое грунта на участке сближения трассы КЛ с трубами ГВС показано на рис. 4. Зависимость изменения температуры жилы КЛ от расстояния между трассами представлена на рис. 5. Как видно, тепловые поля системы ГВС и КЛ взаимодействуют.

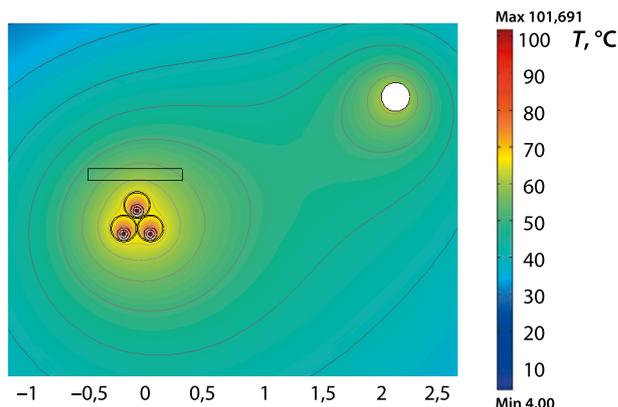
**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ**

Сравнение результатов расчетов допустимого тока жилы по методике [1] и методом конечных элементов при температуре воздуха 0 и 20 °С представлено в табл. 1 и на рис. 6. Расчеты были проведены для двух критериев: температура жилы равна 90 °С, температура трубы 40 °С.

Как видно, различие при выполнении расчетов по разным методикам для КЛ с двухсторонним заземлением экрана значительно меньше, чем для КЛ с транспонированным экраном.

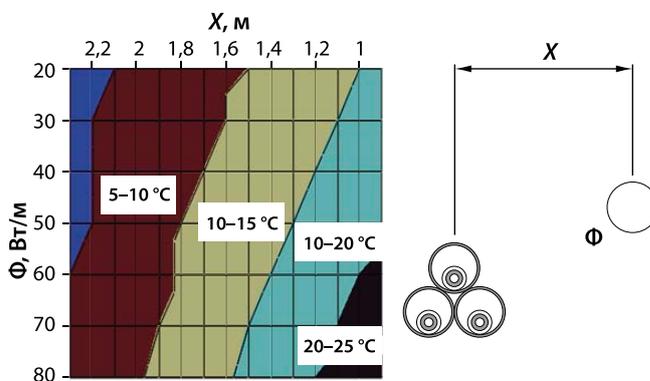
Тепловое поле КЛ вблизи от трубы ГВС

Рис. 4 •



Зависимость изменения температуры жилы КЛ от расстояния до теплоотрассы с тепловым потоком  $\Phi$

Рис. 5 •



Сравнение результатов расчетов допустимых токов жилы КЛ, когда фазы проложены в полиэтиленовых трубах 225 мм, заполненных воздухом

Таблица 1 •

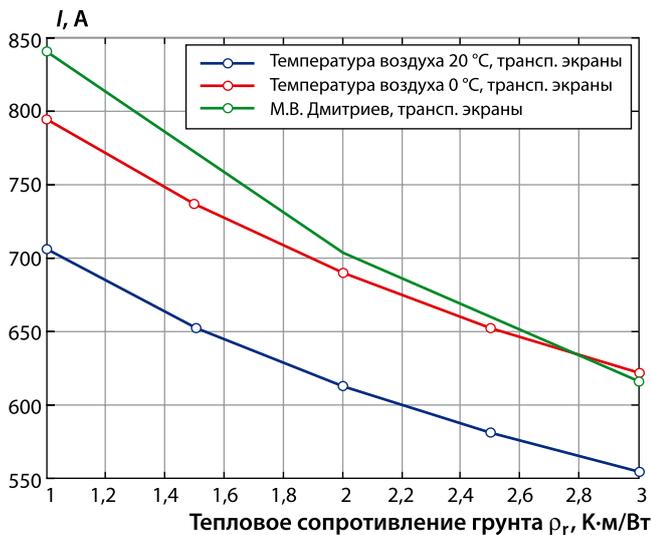
Конструкция	$P_з / P_{ж}$ , о.е.	Критерий	Тепловое сопротивление грунта $\rho_{г}$ , К · м/Вт				
			1	1,5	2	2,5	3
Экраны транспонированы	$0^* / 0,026^{**}$	$T_{ж} \leq 90 \text{ } ^\circ\text{C}$	841*	x	703	x	615
			705**	652	612	582	555
			795***	736	690	652	620
		$T_{тр} \leq 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	468*	x	380	x	327
			410**	380	350	328	310
			556***	516	480	450	430
Экраны заземлены с двух сторон	$3,1^* / 1,52^{**}$	$T_{ж} \leq 90 \text{ } ^\circ\text{C}$	463*	x	383	x	334
			460**	425	400	376	358
			520***	478	448	424	403
		$T_{тр} \leq 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	x	x	x	x	x
			255**	235	223	205	195
			350***	320	300	283	269

\* Методика [1];

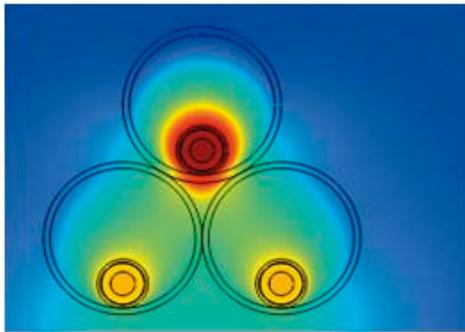
\*\* Метод конечных элементов, температура воздуха 20 °С;

\*\*\* Метод конечных элементов, температура воздуха 0 °С.

• **Рис. 6.** Зависимость допустимых токов КЛ с транспонированными экранами для критерия  $T_{ж} < 90^{\circ}\text{C}$  от теплового сопротивления грунта



• **Рис. 7.** Распределение температуры в сечении КЛ с двусторонним заземлением экранов при прокладке в трубах треугольником



Распределение температуры для КЛ с двусторонним заземлением экранов показано на рис. 7. Применен популярный способ прокладки треугольником. Видно, что верхняя фаза КЛ перегрета относительно двух других. Это обстоятельство объясняется тем, что она практически окружена воздушными полостями с весьма ограниченной возможностью для конвекции (малый объем воздуха в трубе). Таким образом, прокладка КЛ в трубах треугольником – плохое решение с точки зрения отвода тепла.

### ВЫВОДЫ

1. Методика, предложенная в [1], может быть использована для теплового расчета КЛ, но только для приближенных оценок. В общем случае применять ее при проектировании, на наш взгляд, не следует, так как она не позволяет учитывать особенности реальной конструкции КЛ и окружающей среды. Необходимо использовать компьютерное моделирование.
2. Выводы, приведенные в [1] относительно перегрева обычных полиэтиленовых труб, верны.
3. Прокладка фаз КЛ в трубах треугольником существенно затрудняет теплоотвод от верхней фазы КЛ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 4(82).
2. Титков В.В., Дудкин С.М. Влияние способов прокладки на температурный режим кабельных линий 6–10 кВ и выше // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 3(75).
3. Дмитриев М.В. Термическая стойкость кабельных линий 6–500 кВ. Требования к полиэтиленовым трубам // Кабель-News. 2014. № 1.

## КОММЕНТАРИЙ

# Методы различны, выводы совпадают

**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н., заместитель генерального  
директора по научной работе  
Проектно-конструкторского бюро  
«РосЭнергоМонтаж»,  
г. Санкт-Петербург

Должен отметить, что разработка аналитической методики теплового расчета КЛ ни в коем случае не была целью моей статьи «Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет», на которую ссылаются авторы предыдущего материала В.В. Титков и А.В. Косоруков. Во-первых, потому что аналитическая методика уже разработана, утверждена МЭК и используется во всем мире. Во-вторых, потому что существуют специальные компьютерные программы, такие как ELCUT и др.

Предложенный в моей статье аналитический расчет, основанный на максимально упрощенном видении известной методики стандарта МЭК, потребовался лишь для того, чтобы любой инженер мог без особого труда самостоятельно убедиться в несоответствии характеристик ПНД-труб условиям работы кабельных линий.

По моему глубокому убеждению, при решении технических задач лучше, если есть возможность, использовать разные подходы:

- упрощенный аналитический расчет;
- уточненный расчет с использованием специальных компьютерных программ;
- натурный эксперимент.

Поэтому для меня как инженера отрадно, что уважаемые коллеги, воспользовавшись компьютерной программой, пришли точно к такому же выводу, какой я получил в ходе аналитического расчета: ПНД-трубы не годятся для прокладки КЛ.

Причем, как следует из их исследований, погрешность приведенного мною упрощенного расчета является разумной и он вполне может быть использован для быстрых оценок температуры кабеля в различных режимах. Хотя, повторюсь, работа не была нацелена на разработку какой-либо методики.

В будущем было бы интересно сравнить результаты компьютерного расчета не только с моей заведомо упрощенной аналитической методикой, но и с куда более точным аналитическим расчетом, выполненным в строгом соответствии со стандартной методикой МЭК. Полагаю, что здесь может быть ряд неожиданностей.

Если с аналитическими и компьютерными расчетами дела обстоят неплохо (они уже выполнены различными коллективами авторов и дают сопоставимые результаты), то с натурными экспериментами сложнее. Аварийность новых кабельных линий пока незначительна, и случаев, когда приходится извлекать кабель из ПНД-трубы для его ремонта или замены, еще было мало. Тем не менее уже зафиксировано несколько инцидентов, когда кабель был защемлен трубой. Известны также показательные ситуации, когда пожар распространялся вдоль ПНД-трубы, и она полностью выгорала на участке длиной в несколько десятков метров.

Следует отметить, что, помимо исследования тепловых режимов ПНД-труб в нормальном режиме работы, следует проанализировать воздействия на трубы при коротких замыканиях в кабеле и за его пределами. Такие аналитические расчеты и выводы по ним будут представлены в следующем номере журнала. Надеюсь, что коллеги в свою очередь поделятся с читателями результатами своих компьютерных расчетов.