

# Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.315

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29101>



*В.В. Титков, К.В. Волошин* ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [kir\\_vol@mail.ru](mailto:kir_vol@mail.ru)

## **К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВОЙ ЗАГРУЗКИ В КАБЕЛЬНОМ БЛОКЕ**

*Аннотация.* Исследована возможность увеличения передаваемой энергии по кабельным линиям, проложенным в кабельном блоке, за счет оптимизации распределения нагрузки. Аналитически рассмотрено тепловое поле кабельного блока. Предложено простое соотношение для определения профиля токовой загрузки блока, руководствуясь однородным распределением температуры кабелей. Для кабельных блоков с большой долей отключенных кабелей или пустых труб представлена методика оптимизации распределения нагрузки в соответствии с теорией плоской задачи потенциала. Кроме того, отмечена приемлемая точность дискретной модели источников для расчета температур в кабельном блоке в сравнении с расчетом МКЭ. Такой подход позволяет производить расчет кабельного блока любых конфигураций и наполнения, в том числе совместного размещения СПЭ и БПИ кабелей в кабельном блоке, что является актуальной задачей в настоящее время.

*Ключевые слова:* кабельный блок, кабельные линии, трубно-блочная канализация электроэнергетики, допустимый длительный ток, пропускная способность.

*Для цитирования:*

Титков В.В., Волошин К.В. К выбору оптимального распределения токовой загрузки в кабельном блоке // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 7–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29101>



V.V. Titkov, K.V. Voloshin ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia✉ [kir\\_vol@mail.ru](mailto:kir_vol@mail.ru)

## ON THE CHOICE OF OPTIMAL POWER DISTRIBUTION IN CABLE DUCT

*Abstract.* The possibility of increasing the transmitted energy through cable lines laid in a cable duct by optimizing power distribution is investigated. The thermal field of the cable block is analytically considered. A simple ratio is proposed to determine the current loading profile of the duct, guided by a homogeneous distribution of cable temperature. For cable ducts with a large proportion of disconnected cables or empty pipes, a method for optimizing load distribution in accordance with the theory of the planar potential problem is presented. In addition, the acceptable accuracy of the discrete source model for calculating temperatures in the cable duct in comparison with the FEM calculation is noted. This approach makes it possible to calculate the cable duct of any configuration and filling, including the joint placement of XLPE and PILC cables in the cable duct, which is currently an urgent task.

*Keywords:* cable duct, cable lines, power cable pipe ducting system, permissible long-term current, current carrying capacity.

*Citation:*

V.V. Titkov, K.V. Voloshin, On the choice of optimal power distribution in cable duct, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 7–20, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29101>

**Введение.** В электросетевых организациях находят широкое применение кабельные блоки, когда кабели размещаются в отверстиях железобетонных панелей, в асбестоцементных или пластмассовых трубах [1–3]. В блочной канализации кабели защищены от внешних воздействий (агрессивности грунтов, блуждающих токов) и механических воздействий<sup>1</sup>. Применение блочной прокладки позволяет избежать вскрытия трасс при ремонтах, замене или дополнительной прокладке кабелей. Вместе с тем, температурный режим кабелей в блоке отличается от случая уединенной прокладки кабеля более затрудненным теплообменом с окружающей средой, а также взаимным тепловым влиянием кабелей блока [4–7]. Раздел 1.3. ПУЭ<sup>2</sup> предлагает расчет допустимых токов БПИ кабелей для некоторых конфигураций бетонного блока с расстоянием между осями отверстий 150 мм, и глубины залегания 0,7 м. Методика<sup>3</sup>, предоставляемая производителем СПЭ кабелей, предлагает применять единый для всех кабелей блока понижающий коэффициент для тока, т.е. не учитываются как положение кабеля в блоке, так и фактическая конфигурация блока. В работах [1–4, 8, 9] рассматриваются особенности теплообмена внутри трубы с кабелем, а в работах [10–12] представлены методики расчета температуры кабелей блока при произвольно заданных токах.

Максимальная длительная токовая нагрузка кабельных линий, проложенных в кабельном блоке, означает выполнение для каждого кабеля условия термической стойкости, что возможно при разных распределениях нагрузки по кабелям блока. В случае однородного распределения

<sup>1</sup> А6-92 Прокладка кабелей в блочной канализации. Материалы для проектирования и рабочие чертежи, Москва, 1992.

<sup>2</sup> Правила устройства электроустановок. Шестое издание, дополненное с исправлениями, Госэнергонадзор, Москва, 2000.

<sup>3</sup> Тепловой расчет пропускной способности КЛ 10 кВ в блочной канализации. Письмо ООО «ТД «Севкабель Санкт-Петербург» № 2090 от 30.06.2010

мощности тепловыделения максимальная температура имеет место в центре сечения кабельного блока. Тогда, ограничивающим пропускную способность блока фактором является предельно допустимая температура кабеля в центре блока. В случае неравномерного распределения – меньшая нагрузка для кабелей в центре сечения блока и большая на периферии сечения – возможно ограничение температуры в его центре без существенного снижения тока кабелей, расположенных по краям блока. В работах [13–15] представлены итеративные подходы к определению оптимальной загрузки блока.

Экспериментальные исследования для реальных трубных кабельных блоков кабельных блоков не в состоянии охватить всех возможных случаев размещения и нагрузки кабелей в блоках. Поэтому актуальность при проектировании и мониторинге силовых кабельных сетей имеют расчетные методы оптимизации профиля токовой загрузки кабельного блока, основанные на теории теплопередачи [16–19].

В данной работе предпринимается попытка найти подходящий для реализации описанного подхода закон распределения токовой нагрузки в сечении кабельного блока на основе двух принципов: – наибольшее возможное приближение к постоянному в сечении блока профилю температуры; – конфигурация нагрузки блока, минимизирующая индивидуальный вклад наиболее термически нагруженных кабелей в среднюю по сечению блока температуру. При этом алгоритмы не являются итерационными, что является существенным преимуществом при принятии решений в процессе оперативного управления кабельной сетью и при проведении проектных работ.

#### Упрощенная модель кабельного блока

В качестве, простейшей модели, допускающей аналитическое решение рассмотрим блок круглого сечения, размещенный в бесконечной области грунта (рис. 1) с постоянным коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и непрерывным законом распределения мощности тепловыделения, зависящей только от расстояния от центра блока  $r$ :

$$q(r) = q_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{r}{R} \right)^\nu \right], \quad (1)$$

где  $R$  – радиус сечения блока,  $\nu > 0$ . Параметр  $\alpha$  связан с отношением мощностей тепловыделения в центре и на краю блока  $\gamma = q_0/q(R)$  выражением:

$$\alpha = \frac{1-\gamma}{\gamma}. \quad (2)$$

Поле температуры в сечении блока можно найти, решая стандартное уравнение стационарной теплопроводности в цилиндрических координатах<sup>4</sup>:

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{r}{R} \right)^\nu \right] = 0, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Решение последнего уравнения с граничными условиями имеет вид:

$$T(x) = \frac{q_0 R^2}{4\lambda} \left[ 1 - x^2 + \frac{4\alpha}{(\nu+2)^2} (1 - x^{\nu+2}) \right] + T_e;$$

<sup>4</sup> Теория теплообмена, под ред. А.И. Леонтьева, Высшая школа, Москва, 1979.

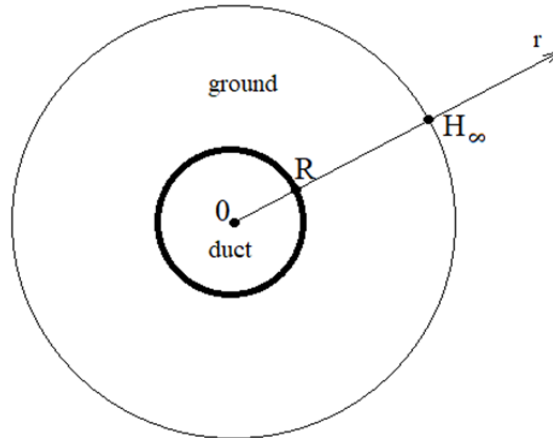


Рис. 1. Упрощенная модель кабельного блока  
Fig. 1. Simplified cable duct model

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (4)$$

$$T(R) = T_e,$$

где  $x = r/R$ .

Постоянную  $q_0$  можно выразить через полную мощность тепловыделения в блоке:

$$Q = 2\pi q_0 \int_0^R r \left[ 1 + \alpha \left( \frac{r}{R} \right)^\nu \right] dr \Leftrightarrow q_0 = \frac{Q}{\pi R^2} \frac{\nu + 2}{\nu + 2 + 2\alpha}. \quad (5)$$

Оптимальному выбору параметра  $\nu$ , характеризующего степень неоднородности мощности тепловыделения в блоке, соответствует наименьшая разность температур  $T(0) - T_e$  в центре и на краю блока. Это соответствует максимально возможной близости распределения температуры по радиусу к однородному. При этом имеем:

$$T(0) - T_e = \frac{Q}{4\pi\lambda} \frac{\nu + 2}{\nu + 2 + 2\alpha} \left( 1 + \frac{4\alpha}{(\nu + 2)^2} \right). \quad (6)$$

Температуру  $T_e$  на поверхности блока можно найти, решая уравнение теплопроводности в области грунта  $r \geq R$ . В этом случае  $q(r) = 0$ , а граничные условия имеют вид:

$$-\lambda_{gr} \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = \frac{Q}{2\pi R}; \quad (7)$$

$$T(H_\infty) = T_{gr},$$

где  $H_\infty$  – расстояние от центра блока до удаленных областей грунта, в которых температура является заданной  $T_{gr}$  и не зависящей от тепловыделения в блоке,  $\lambda_{gr}$  – коэффициент теплопроводности

сти грунта. Обычно  $H_\infty$  составляет несколько десятков метров. В результате решения уравнения теплопроводности для описанных здесь условий находим:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_{gr}(T_{gr} - T_e)}{\ln(H_\infty/R)} \Leftrightarrow T_e = T_{gr} + \frac{Q \ln(H_\infty/R)}{2\pi\lambda_{gr}}. \quad (8)$$

Подставляя последнее выражение в (6) находим:

$$T(0) - T_{gr} = Q \left\{ \frac{\ln(H_\infty/R)}{2\pi\lambda_{gr}} + \frac{1}{4\pi\lambda} \frac{\nu + 2}{\nu + 2 + 2\alpha} \left[ 1 + \frac{4\alpha}{(\nu + 2)^2} \right] \right\}. \quad (9)$$

#### Распределение нагрузки в кабельном блоке по упрощенной модели

Предельную загрузку блока  $Q_{\max}$  можно найти решая последнее уравнение относительно  $Q$  при  $T(0) = T_p$ , где  $T_p$  – максимально допустимая температура кабеля. Для упрощения дальнейшего анализа примем  $\lambda_{gr} = \lambda$  и  $H_\infty/R = 10$ . При этом выражая параметр  $\alpha$  через характеристику неоднородности  $\gamma$  имеем:

$$Q_{\max} = (T_p - T_{gr}) 4\pi\lambda f(\nu, \gamma), \quad (10)$$

$$\text{где } f(\nu, \gamma) = \left\{ 4.6 + \frac{(\nu + 2)^2 + 4(1 - \gamma)/\gamma}{(\nu + 2)(\nu + 2 + 2(1 - \gamma)/\gamma)} \right\}^{-1}.$$

Как можно видеть из графиков зависимостей  $f(\nu, \gamma)$  (рис. 2) существуют оптимальные сочетания степени неоднородности  $\gamma$  и крутизны распределения  $\nu$ , при которых достигается максимум предельной интегральной загрузки блока. При этом  $Q_{\max}$  растет с уменьшением  $\gamma$ . Уменьшение последнего параметра ограничивается технической целесообразностью, обусловленной тем, что неограниченное снижение плотности тока в кабелях, находящихся в центре сечения блока, сделает невозможным нормальное электроснабжение по ним.

Отношение токов в центральном и периферийном кабелях составит  $\gamma^{1/2}$ . Технически целесообразным значение параметра  $\gamma$  можно положить равным 0,4–0,5, что соответствует 40–30% снижению нагрузочного тока в центральном кабеле по сравнению с периферийным. При данном значении  $\gamma$  максимум пропускной способности блока имеет место при  $\nu \approx 3$  (рис. 2). Таким образом, оптимальный профиль токовой загрузки блока прямоугольного сечения размерностью  $N_x \times N_y$  ячеек можно описать с помощью формулы:

$$L_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left( 4 \frac{(j - N_{cx})^2 + (i - N_{cy})^2}{(N_x - 1)^2 + (N_y - 1)^2} \right)^3}, \quad (11)$$

где  $N_{cx} = 0,5(N_x + 1)$ ,  $N_{cy} = 0,5(N_y + 1)$ . Пример профиля загрузки рассчитанного по формуле (11) приведен на рис. 3.

Рассмотренный выше подход тем не менее имеет ограничения, связанные с тем, что реальная форма сечения блока практически во всех случаях прямоугольная и найденное выше точное решения для блока круглого сечения в реальных условиях выполняется с некоторой долей приближения. При этом интенсивность теплообмена блока с окружающей средой (грунт) неравномерна по поверхности блока. В частности, большая часть теплового потока приходится на верхнюю,

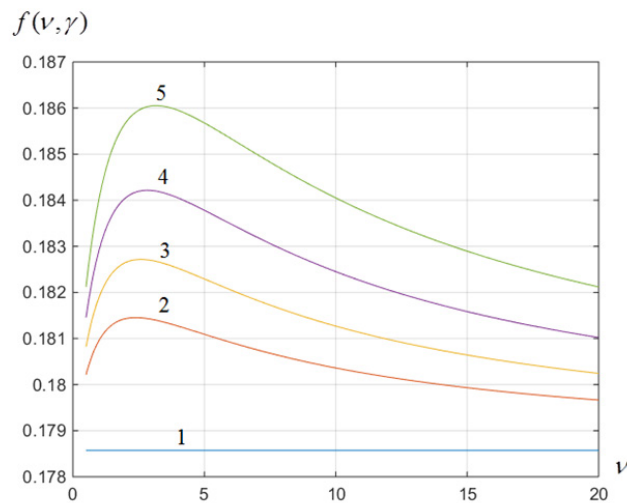


Рис. 2. Зависимость показателя предельной интегральной загрузки кабельного блока от параметров распределения мощности тепловыделения: крутизны профиля  $v$  и степени неоднородности  $\gamma = q_0/q(R)$ : 1(1); 0,7 (2); 0,6 (3); 0,5 (4); 0,4 (5)

Fig. 2. The dependence of the indicator of the maximum integral load of the cable duct on the parameters of the heat dissipation power: the steepness of the profile  $v$  and the degree of heterogeneity  $\gamma = q_0/q(R)$ : 1(1); 0,7 (2); 0,6 (3); 0,5 (4); 0,4 (5)

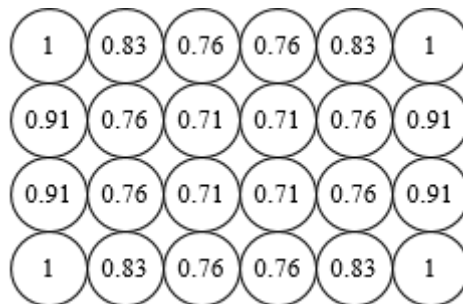


Рис. 3. Схема оптимальной токовой загрузки кабелей в блоке  $6 \times 4$

Fig. 3. Diagram of optimal current loading of cables in the duct  $6 \times 4$

обращенную к поверхности грунта плоскость. Поэтому оптимальная схема загрузки блока, учитывающее это обстоятельство должна обладать соответствующей асимметрией относительно горизонтальной оси, проходящей через центр сечения блока.

### Распределение нагрузки в кабельном блоке по дискретной модели источников

Практикой и нормами проектирования кабельных сетей в трубных блоках всегда предусмотрены пустые кабельные каналы, а также т.н. “мертвые” кабели, не подключенные сети. Расположение пустых кабельных каналов и “мертвых” кабелей в блоке может носить вполне случайный характер, а при большом их количестве выражение (11) не будет обеспечивать оптимальное распределение нагрузки в блоке. Поэтому для поиска оптимальной схемы токовой загрузки блока целесообразен подход, основанный на дискретной модели распределения источников нагрева в пределах сечения блока. Для этого воспользуемся теорией плоской задачи потенциала<sup>5</sup>. При наличии произвольного набора линейных источников тепла  $P_k$  с координатами следов в плоскости  $x, y: x_k, y_k, k = 1..M$  (рис. 4).

<sup>5</sup> В.Я. Арсенин, Уравнения математической физики и специальные функции. Наука, Москва, 1984.

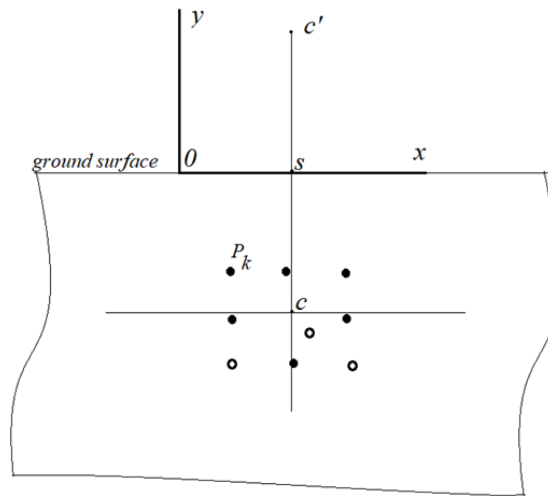


Рис. 4. К расчету температуры от совокупности линейных источников  
 Fig. 4. To calculation the temperature from a set of linear sources

Приращение температуры нагрева в некоторой точке  $x, y$  бесконечной среды с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , создаваемое линейным источником  $P_k$  составит:

$$T_k(x, y) = \frac{P_k}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{\sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}}, \quad (12)$$

где  $H_\infty$  – расстояние до удаленных от источника нагрева точек в среде. Для упрощения дальнейшего анализа без ограничения общности результатов температуру удаленных точек среды можно положить равной нулю.

Для учета заданной на поверхности грунта температуры  $T_s$  разместим в точке  $c'$ , расположенной симметрично относительно поверхности грунта фиктивный отрицательный источник (сток)  $P_{c'}$ , действие которого в неограниченной среде совместно со всеми источниками  $P_k$ , будет создавать заданную температуру на поверхности  $T_s$ :

$$\sum_{i=1}^M \frac{P_i}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}} + \frac{P_{c'}}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{c's}} = T_s, \quad (13)$$

где  $r_{si} = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}$ ,  $r_{c's} = \sqrt{(x_s - x_{c'})^2 + (y_s - y_{c'})^2}$ . Откуда находим:

$$P_{c'} = \frac{T_s - \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}}. \quad (14)$$

Средняя температура в сечении кабеля  $k$  (или трубы при трубной прокладке) блока с произвольной конфигурацией, создаваемая, как собственным током с линейной мощностью нагрева  $P_k$ , так и всеми остальными кабелями блока  $P_i$ , а также фиктивным источником  $P_{c'}$  найдется по формуле:

$$T_k = \sum_{i=1}^M a_{k,i} P_i + b_k, \quad k = 1 \dots M;$$

$$a_{k,i} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{ki}} - \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}} \frac{\ln \frac{H_\infty}{r_{c'k}}}{\ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}};$$

$$b_k = T_S \frac{\ln \frac{H_\infty}{r_{c'k}}}{\ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}}; \quad (15)$$

$$r_{ki} = \begin{cases} \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} & k \neq i; \\ R_k & k = i \end{cases};$$

$$r_{c'k} = \sqrt{(x_k - x_{c'})^2 + (y_k - y_{c'})^2},$$

где  $R_k$  – радиус сечения кабеля  $k$  (или трубы при трубной прокладке).

Далее рассмотрим оптимизацию профиля загрузки блока, основанное на формулах (15) на примере блока размерностью  $6 \times 4$  заглубленного на 800 мм с полным или частичным заполнением каналов (рис. 5).

Один из подходов к оптимизации распределения нагрузки в блоке на основе выражения (15) сводится к такому выбору нагрузок  $P_i$ , при котором вклад от наиболее термически нагруженных кабелей в среднюю температуру по сечению блока  $T_{av}$  был бы минимальным. Последнюю найдем, суммируя построчно (15):

$$T_{av} = \frac{1}{M} \left[ P_1 \sum_{i=1}^M a_{1i} + P_2 \sum_{i=1}^M a_{2i} + \dots + P_M \sum_{i=1}^M a_{Mi} + \sum_{i=1}^M b_i \right]. \quad (16)$$

Если выбрать нагрузки  $P_k$  обратно пропорциональными коэффициентам  $(\sum a_{ki})^{\beta/2}$ , где  $\beta > 0$ , то относительная загрузка для кабелей, создающих наибольший нагрев, например, находящихся в центре блока, где температура максимальна, будет ниже, чем для кабелей, расположенных на периферии сечения блока. Заметим также, что в случае пустых труб или “мертвых” кабелей соответствующие коэффициенты под знаками сумм в (16)  $a_{ki} = 0$ , где индекс  $i$  – соответствует пустой ячейке блока. Поэтому описанный способ автоматически учитывает не только наличие, но и положение пустых ячеек в блоке. Параметр  $\beta$  выбирается исходя из заданного допустимого снижения нагрузочного тока кабеля  $\gamma = L_{kmin}/L_{kmax}$ . Таким образом, относительный коэффициент загрузки кабеля  $k$  найдем по формуле:

$$L_k = \sqrt{\left( \frac{f_k}{f_{max}} \right)^\beta};$$

$$f_k = \left( \sum_{i=1}^M a_{ki} \right)^{-1};$$



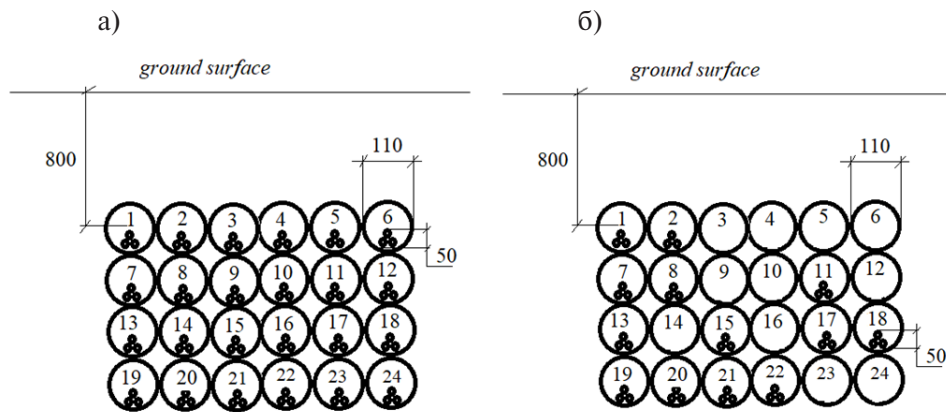


Рис. 5. Трубный блок  $6 \times 4$ : а – при 100% использовании каналов;  
б – при частичном (трубы 3–6, 9, 10, 12, 14, 16, 23, 24 пустые)

Fig. 5. Cable duct  $6 \times 4$ : a – 100% filling; b – partially filling (3–6, 9, 10, 12, 14, 16, 23, 24 pipes are empty)

$$\beta = 2 \frac{\ln(\gamma)}{\ln(f_{\min}/f_{\max})}; \quad (17)$$

$$f_{\max} = \max\{f_1, f_2 \dots f_M\};$$

$$f_{\min} = \min\{f_1, f_2 \dots f_M\}.$$

В качестве примера рассмотрим трубный блок рис. 5а. Оптимизированный по (17) профиль загрузки для случая  $\gamma = 0,7$  при использовании всех кабельных линий блока показан на рис. 6а. Профиль загрузки учитывает различие в условиях теплообмена на верхней и нижней поверхности кабельного блока, коэффициенты токовой загрузки для верхних кабелей блока выше, чем для нижних. В случае загрузки лишь части каналов, как, например, на рис. 5б, максимальное значение тока увеличивается, максимум (коэффициент равен 1) смещается в трубу с наилучшими тепловыми условиями (рис. 6б). В рассматриваемом случае происходит смещение в трубу 18 из угловой (1 и 6) при 100% загруженном блоке.

Сравнивая рис. 6а с рис. 7 можно видеть повышение нагрузки в каналах, расположенных рядом с “пустыми” ячейками блока.

### Численное моделирование

В программном комплексе COMSOL Multiphysics построена модель блока с рис. 5б (кабель 3хАПвПу2г 50 мм<sup>2</sup>, Допустимая температура 90°C, Хризотилцементная труба 110 мм, Температура воздуха 22°C). Параметры, принятые при моделировании описаны в [2]. Произведен расчет температуры в блоке для токов, распределенных по закону:

$$I_k = C_0 L_k I_{\text{доп}}, \quad (18)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток кабеля при уединенной прокладке (195 А);  $L_k$  – коэффициент положения кабеля в блоке (рис. 6а и 6б);  $C_0$  – параметр, обеспечивающий выполнение условие термической стойкости.  $C_0$  меньше единицы и имеет одно значение для всех кабелей блока, определялся итеративно. Результаты расчета допустимого тока кабелей и теплового поля для частично заполненного блока (рис. 5б) с профилями нагрузки рис. 6а и 6б представлены на рис. 8.

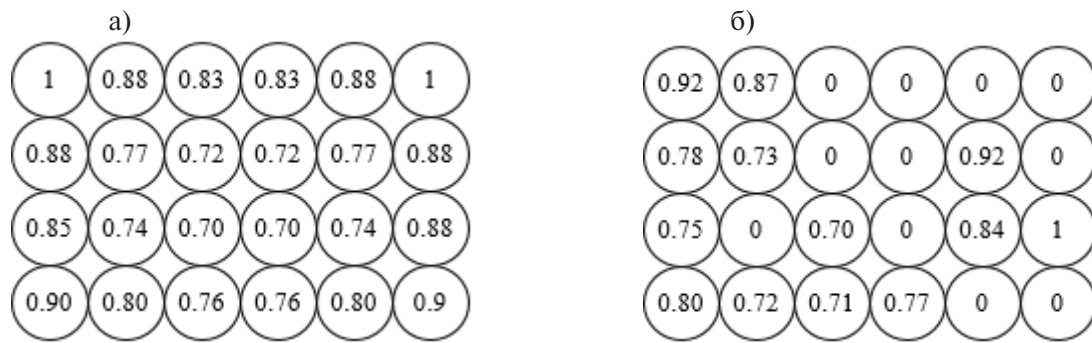


Рис. 6. Оптимизированный профиль токовой загрузки по критерию минимального вклада в среднюю температуру трубного блока  $6 \times 4$ : а – при 100% использовании каналов; б – при частичном

Fig. 6. Optimized current loading profile according to the criterion of minimum contribution to the average temperature of the cable duct  $6 \times 4$ : a – 100% filling; b – partially filling

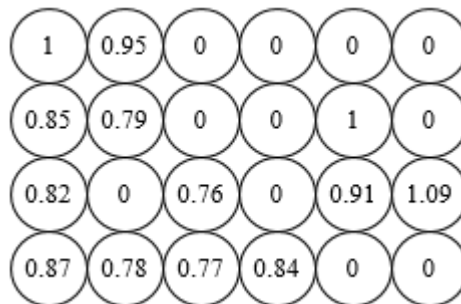


Рис. 7. Перенормированный профиль токовой загрузки для частично заполненного блока  $6 \times 4$  по первой трубе на блок с полным заполнением

Fig. 7. Renormalized current loading profile for a partially filled  $6 \times 4$  duct along the first pipe to a duct with full filling

Результаты моделирования показывают, что применение профиля нагрузки, учитывающего наличие и положение пустых труб, в рассматриваемом случае позволило увеличить ток в отдельных кабелях (в трубах 11, 17, 18) на 20–27%. Вместе с тем, можно заметить, что отклонение до допустимой температуры хотя и существенно сократилось, составляет более  $10^\circ\text{C}$ . Это можно объяснить неоднородностью распределения теплопроводности, в то время, как в выражении (15) теплопроводность принята одинаковой для всей рассматриваемой области. Несмотря на указанное замечание, применение предложенной методики определения оптимального профиля нагрузки представляется целесообразным, ввиду существенного увеличения пропускной способности кабельных линий блока.

Следует обратить внимание, что выражение (15) позволяет производить расчет температур в кабельном блоке. Так, для рассматриваемого частично заполненного трубного блока  $6 \times 4$  с фазными токами, указанными на рис. 6б, результат расчета по (15) представлен на рис. 9. Сопротивление одной фазы принято равным  $0,00067 \text{ Ом/м}$ .

Сравнивая рис. 8б с рис. 9 можно видеть, что отклонения температур при расчете по выражению (15) не превышают  $8^\circ\text{C}$  (10%). Таким образом, можно утверждать, что применение дискретной модели источников для расчета температур в кабельном блоке обеспечивает приемлемую точность расчета по меньшей мере в отношении средних по сечению труб блока температур.



токов в сечении блока, обеспечивающий максимальный передаваемый в блоке ток при заданной допустимой температуре кабеля. Предложено простое соотношение для коэффициентов распределения токовой нагрузки кабелей в реальном блоке, которое целесообразно для использования при малом количестве (< 30%) пустых труб или отключенных кабелей. В противном случае (при большом количестве пустых труб и т.д.) в кабельном блоке может возникать несколько центров тепловыделения. Для такого случая предложен второй подход, основанный на теории потенциала. Он адекватно учитывает конечную величину заглубления блока в грунт, расстояние между кабелями, их положение, а также наличие пустых кабельных каналов (труб) и отключенных от сети кабелей.

Представляется, что применение дискретной модели источников для расчета температур в кабельном блоке является перспективным, особенно в проектной работе электросетевых организаций.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Titkov V.V., Dudkin S.M., Tukeev P.D., Kosorukov A.V.** The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks, Magazine of Civil Engineering, 50 (06) (2014) 75–83. DOI: 10.5862/MCE.50.8

[2] **Лубков А.Н., Титков В.В., Тукеев П.Д.** Тепловой режим кабельной линии в полимерной трубе, Электроэнергия. Передача и распределение. 3 (48) (2018) 84–90.

[3] **Helleso S.M., Eberg E.** Simplified Model for Heat Transport for Cables in Pipes, IEEE Transactions on Power Delivery, 37 (5) (2022) 3813–3822. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3137876

[4] **de Leon F.** Major factors affecting cable ampacity, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting (2006) 6 pp. DOI: 10.1109/PES.2006.1708875

[5] **Ratkowski F.** The Effect of Cable Duct Diameter on the Ampacity of High-Voltage Power Cables, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 1 (3) (2022) 143–146. DOI: 10.15199/48.2022.03.32

[6] **Dang C., Cote J., Tarnowski J.** Emergency-Temperature Testing on MV Jacketed Reduced-Wall TRXLPE Aluminum Cable Systems in Duct Bank, IEEE Transactions on Power Delivery, 33 (6) (2018) 2894–2900. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855111

[7] **Masnicki R., Mindykowski J., Palczynska B.** The Laboratory Stand for the Evaluation of Heat Dissipation from the Power Cable in a Casing Pipe, 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) (2022) 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854621

[8] **Sedaghat A., Lu H., Bokhari A., de Leon F.** Enhanced Thermal Model of Power Cables Installed in Ducts for Ampacity Calculations, IEEE Transactions on Power Delivery, 33 (5) (2018) 2404–2411. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2841054

[9] **Colef J.-M., de Leon F.** Improvement of the Standard Ampacity Calculations for Power Cables Installed in Trefoil Formations in Ventilated Tunnels, IEEE Transactions on Power Delivery, 37 (1) (2022) 627–637. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3068111

[10] **Fu C., Liang Y., Sun Y., Li Q., Zhao Z., Wang J.** Research on fast real-time calculation model for transient temperature rise of power cables in ducts, Energy Reports, 7 (2021) 239–245. DOI: 10.1016/j.egy.2021.01.074

[11] **Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N.** Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity, 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) (2016) 1–6. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514107

[12] **Ramirez L., Anders G.J.** Cables in Backfills and Duct Banks – Neher/McGrath Revisited, IEEE Transactions on Power Delivery, 36 (4) (2021) 1974–1981. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017616

[13] **Moutassem W., Anders G.J.** Configuration Optimization of Underground Cables for Best Ampacity, IEEE Transactions on Power Delivery, 25 (4) (2010) 2037–2045. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2046652

- [14] **Niu H., Guo R.** Position optimization of cables in ducts with FEM, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) (2016) 493–496. DOI: 10.1109/CMD.2016.7757869
- [15] **Zarchi D.A., Vahidi B., Haji M.M.** Optimal configuration of underground cables to maximise total ampacity considering current harmonics, IET Generation, Transmission & Distribution, 8 (6) (2014) 1090–1097. DOI: 10.1049/iet-gtd.2013.0349
- [16] **Petrović G., Cvetković M., Garma T., Kilić T.** An approach to thermal modeling of power cables installed in ducts, Electric Power Systems Research, 214 (2023) 108916. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108916
- [17] **Lux J., Czerniuk T., Olschewski M., Hill W.** Non-Concentric Ladder Soil Model for Dynamic Rating of Buried Power Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, 36 (1) (2021) 235–243. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2977052
- [18] **Callender G., Goddard K.F., Dix J.K., Lewin P.L.** A Flexible Model to Calculate Buried Cable Ampacity in Complex Environments, IEEE Transactions on Power Delivery, 37 (3) (2022) 2007–2015. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3102414
- [19] **Enescu D., Colella P., Russo A.** Thermal Assessment of Power Cables and Impacts on Cable Current Rating: An Overview, Energies, 13 (20) (2020) 5319. DOI: 10.3390/en13205319

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ТИТКОВ Василий Васильевич** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: titkovprof@yandex.ru

**ВОЛОШИН Кирилл Валерьевич** – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: kir\_vol@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-7452>

### REFERENCES

- [1] **V.V. Titkov, S.M. Dudkin, P.D. Tukeyev, A.V. Kosorukov,** The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks, Magazine of Civil Engineering, 50 (06) (2014) 75–83. DOI: 10.5862/MCE.50.8
- [2] **A.N. Lubkov, V.V. Titkov, P.D. Tukeyev,** Teplovoy rezhim kabelnoy linii v polimernoy trube [Thermal mode of a cable line in a polymer pipe], ELECTRIC POWER. Transmission and distribution. 3 (48) (2018) 84–90.
- [3] **S.M. Helleso, E. Eberg,** Simplified Model for Heat Transport for Cables in Pipes, IEEE Transactions on Power Delivery, 37(5) (2022) 3813–3822. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3137876
- [4] **F. de Leon,** Major factors affecting cable ampacity, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting (2006) 6 pp. DOI: 10.1109/PES.2006.1708875
- [5] **F. Ratkowski,** The Effect of Cable Duct Diameter on the Ampacity of High-Voltage Power Cables, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 1 (3) (2022) 143–146. DOI: 10.15199/48.2022.03.32
- [6] **C. Dang, J. Cote, J. Tarnowski,** Emergency-Temperature Testing on MV Jacketed Reduced-Wall TRXLPE Aluminum Cable Systems in Duct Bank, IEEE Transactions on Power Delivery, 33 (6) (2018) 2894–2900. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855111
- [7] **R. Masnicki, J. Mindykowski, B. Palczynska,** The Laboratory Stand for the Evaluation of Heat Dissipation from the Power Cable in a Casing Pipe, 2022 IEEE International Conference on Environment and Electri-

cal Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe) (2022) 1–6. DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854621

[8] **A. Sedaghat, H. Lu, A. Bokhari, F. de Leon**, Enhanced Thermal Model of Power Cables Installed in Ducts for Ampacity Calculations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (5) (2018) 2404–2411. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2841054

[9] **J.-M. Colef, F. de Leon**, Improvement of the Standard Ampacity Calculations for Power Cables Installed in Trefoil Formations in Ventilated Tunnels, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37 (1) (2022) 627–637. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3068111

[10] **C. Fu, Y. Liang, Y. Sun, Q. Li, Z. Zhao, J. Wang**, Research on fast real-time calculation model for transient temperature rise of power cables in ducts, *Energy Reports*, 7 (2021) 239–245. DOI: 10.1016/j.egy.2021.01.074

[11] **S. Dubitsky, G. Greshnyakov, N. Korovkin**, Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity, 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) (2016) 1–6. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514107

[12] **L. Ramirez, G.J. Anders**, Cables in Backfills and Duct Banks – Neher/McGrath Revisited, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36 (4) (2021) 1974–1981. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017616

[13] **W. Moutassem, G.J. Anders**, Configuration Optimization of Underground Cables for Best Ampacity, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (4) (2010) 2037–2045. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2046652

[14] **H. Niu, R. Guo**, Position optimization of cables in ducts with FEM, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) (2016) 493–496. DOI: 10.1109/CMD.2016.7757869

[15] **D.A. Zarchi, B. Vahidi, M.M. Haji**, Optimal configuration of underground cables to maximise total ampacity considering current harmonics, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8 (6) (2014) 1090–1097. DOI: 10.1049/iet-gtd.2013.0349

[16] **G. Petrović, M. Cvetković, T. Garma, T. Kilić**, An approach to thermal modeling of power cables installed in ducts, *Electric Power Systems Research*, 214 (2023) 108916. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108916

[17] **J. Lux, T. Czerniuk, M. Olschewski, W. Hill**, Non-Concentric Ladder Soil Model for Dynamic Rating of Buried Power Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36 (1) (2021) 235–243. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2977052

[18] **G. Callender, K.F. Goddard, J.K. Dix, P.L. Lewin**, A Flexible Model to Calculate Buried Cable Ampacity in Complex Environments, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37 (3) (2022) 2007–2015. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3102414

[19] **D. Enescu, P. Colella, A. Russo**, Thermal Assessment of Power Cables and Impacts on Cable Current Rating: An Overview, *Energies*, 13 (20) (2020) 5319. DOI: 10.3390/en13205319

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Vasily V. TITKOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: titkovprof@yandex.ru

**Kirill V. VOLOSHIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: kir\_vol@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-7452>

**Поступила: 25.12.2022; Одобрена: 12.02.2023; Принята: 13.02.2023.**  
**Submitted: 25.12.2022; Approved: 12.02.2023; Accepted: 13.02.2023.**