

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ 3D-МОДЕЛЬ ЭКРАНИРОВАННОГО КАБЕЛЯ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВ

*Р. В. Яковенко, А. П. Осипцов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

С учетом современных темпов развития промышленности и компьютерных технологий в процесс проектирования и разработки необходимо внедрять новые методы и программные продукты. Внедрение расчётных методов моделирования позволяет существенно сократить время разработки изделий и уже на этапе проектирования исключить необоснованные временные и ресурсные издержки.

Один из методов – выполнение оценочных расчётов основных характеристик разрабатываемых изделий на этапе эскизного проектирования, позволяющих корректировать разработку, а также определять наиболее критические режимы для проведения будущих испытаний, тем самым сокращая время и затраты. Появление суперкомпьютеров позволяет проводить расчеты огромной сложности. Но возможность проводить небольшие оптимизационные расчеты самостоятельно на рабочем месте разработчика исключает из временной ленты рабочего процесса такие пункты как ожидание результата, время на транспортировку стартовых моделей и результатов, оптимизация модели под архитектуру вычислительной машины, и т.д. Кроме того, это позволяет не тратить вычислительные мощности на десятки мелких задач, а направлять на решение более важных, крупных проектов.

Для оценки электрических характеристик изделий возникает, в том числе, необходимость создания электрических эквивалентных моделей экранированного или коаксиального кабеля (рис. 1). Построение этих моделей можно выполнять различными методами.



Рис. 1. Импульсные коаксиальные кабели КИМЭП-К (вверху) и КИМЭПМ (внизу)

Точная геометрическая модель – модель, построенная с максимально возможным соответствием реальному кабелю. Данная модель способна точно передавать все характеристики кабеля, но после построения расчетной сетки содержит огромное количество элементов, что требует значительной вычислительной мощности. Кроме того, построение такой модели само по себе достаточно трудоемко.

Упрощенная геометрическая модель – модель, построенная по основным габаритным характеристикам кабеля, таким как максимальный диаметр жилы, толщины изоляции, оплетки, экранов и т. п. Данная модель полностью применима для компоновочных операций. Модель не способна воспроизвести свойства, зависящие от действительной площади сечения (проводимость, прочность и т. п.).

Модель с корректировкой свойств – упрощенная геометрическая модель с поправочными коэффициентами в характеристиках проводящих и изолирующих сред для приведения основных электрических характеристик моделируемого кабеля к реальным значениям. Возможно, также, введение коэффициентов для прочностных характеристик. Введение поправочных коэффициентов расширяет применение предыдущей модели до электрических расчетов, связанных с проводимостью, прочностью. В отдельных случаях можно использовать для расчетов с учетом собственных емкости и индуктивности моделируемого кабеля. Является относительно легко реализуемым методом. Для разработчика необходимо один раз вывести поправочные коэффициенты для используемых материалов к каждому рассчитываемому кабелю, и использовать их во всех дальнейших расчетах. Главным недостатком модели является невозможность учитывать сразу все особенности взаимодействия кабеля с внешней средой.

Модель с эквивалентной геометрией – модель с неизменными свойствами материалов, но геометрией, пересчитанной таким образом, чтобы основные электрические свойства проводников были сохранены. В зависимости от моделей, представляется возможным сохранять характеристики проводимости, индуктивности, в отдельных случаях – емкости. Из-за изменения геометрии модели не применимы в компоновочных операциях и прочностных расчетах. С оговорками, может быть применена для расчетов взаимодействий с внешней средой.

Комбинированная модель с граничными условиями – модель, сочетающая в себе методы эквивалентной геометрии и корректировки свойств и граничных условий. Позволяет адаптировать модель к любым видам расчетов в зависимости от нужд разработчика. Вероятно, является единственным вариантом для построения моделей в комбинированных расчетах, где необходимо учитывать сразу несколько типов влияний (например, наведение токов в кабеле при воздействии внешних магнитных или электрических полей).

Очевидно, что для компоновочных операций применения простой геометрической модели достаточно. Прочностные расчеты проводятся отдельно от электрических, и для них достаточно применения поправочных коэффициентов. Модель с корректировкой свойств и модель с эквивалентной геометрией способны выполнять одни и те же задачи. Во многом, выбор между этими моделями определяется личными предпочтениями разработчика. Авторы статьи выбрали основным метод построения моделей с эквивалентной геометрией [1], расширив его области применения введением поправочных коэффициентов и граничных условий, тем самым получив комбинированную модель. Основным критерием выбора для авторов была возможность применения моделей на различных программных платформах с минимальными вмешательствами в физические настройки (принцип «сделал один раз и используешь постоянно»). Именно применение эквивалентной геометрии дает более широкую возможность переноса моделей между различными программными продуктами, поскольку в разных программах имеют место разные методы задания свойств материалов и зависимости между ними. Это может внести дополнительные сложности при определении необходимых поправочных коэффициентов. В случае эквивалентной геометрии, модель строится в любом удобном пакете для 3D-моделирования, переносится в расчетную программу, в которой вносятся необхо-

димые условия расчета. При этом, остается возможность внести поправочные коэффициенты, если это необходимо.

### Модель с эквивалентной геометрией

Модель с эквивалентной геометрией является легко реализуемой, успешно применяется авторами для проведения электрических расчетов. При отсутствии необходимости учитывать внешние магнитные и электрические поля, авторы считают этот тип модели предпочтительным в расчетах, поскольку при необходимости они легко переносятся между расчетными программами и их легко воспроизвести с нуля, обладая лишь исходными данными. Данная модель позволяет путем преобразований геометрии кабеля привести характеристики модели к реальным характеристикам кабеля, сделав его электрически эквивалентным.

Электрическая эквивалентность – электрические параметры модели кабеля (сопротивление, индуктивность, при необходимости – ёмкость) близки к параметрам реального кабеля с принятыми допустимыми отклонениями и упрощениями.

Далее приводится алгоритм, выработанный авторами для расчета эквивалентных геометрических характеристик кабелей. Он учитывает эквивалентность только сопротивлению и индуктивности, поскольку в проводимых авторами расчетах емкость кабеля пренебрежимо мала (порядок величины ёмкости 1 метра кабеля –  $10^{-12}$ , тогда как в среднем порядок ёмкости остальных элементов системы –  $10^{-6}$ ).

Погонная индуктивность:

$$L = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \ln \frac{q}{p}, \quad (1)$$

где  $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ,  $q$  и  $p$  – размеры, указанные на рис. 2, в миллиметрах [2].

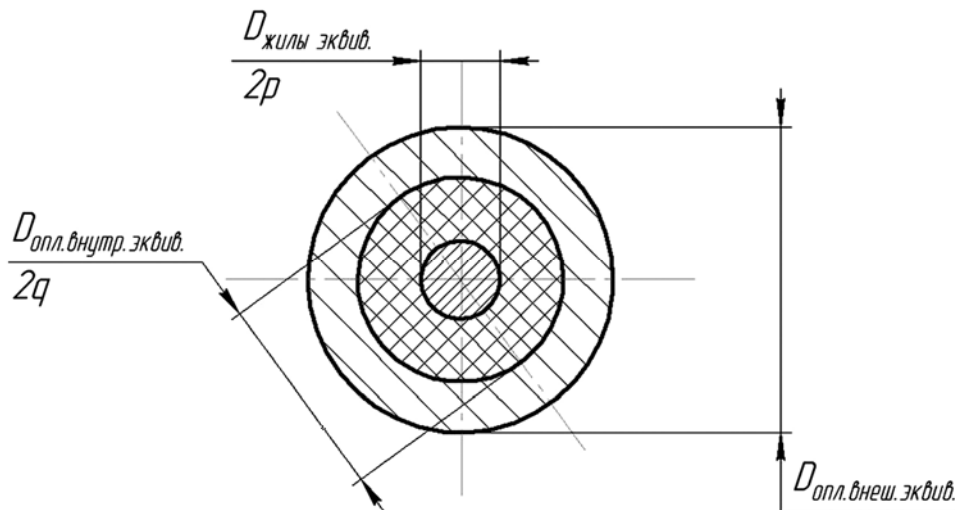


Рис. 2. Основные линейные размеры для эквивалентной модели

Площадь поперечного сечения сплошного цилиндра (жила):

$$S_{\text{жил. экв.}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{жил. экв.}}^2}{4} \quad (2)$$

Для полого цилиндра (оплётка):

$$S_{\text{опл. экв.}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{опл. внеш. экв.}}^2 - D_{\text{опл. внут. экв.}}^2) = S_{D, \text{опл. внеш. экв.}} - S_{D, \text{опл. внут. экв.}} \quad (3)$$

где  $S_{D, \text{опл. внеш. экв.}}$  – площадь сечения по большему диаметру ( $\text{мм}^2$ ),  $S_{D, \text{опл. внут. экв.}}$  – площадь сечения по меньшему диаметру ( $\text{мм}^2$ ).

### Алгоритм для перерасчёта диаметров эквивалентных моделей

1) Расчёт эквивалентного диаметра жилы:

$$D_{\text{жил. экв.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{жил. реал.}}}{\pi}} \quad (4)$$

Опираясь на необходимость сохранить эквивалентную индуктивность, рассчитывается эквивалентный внутренний диаметр оплётки:

$$q = pe^{\left( \frac{L_{\text{реал.}} \cdot 2 \cdot \pi}{\mu} \right)}, D_{\text{опл. внут. экв.}} = 2q \quad (5)$$

2) В процессе округления значений неизбежно появляются отклонения от действительных значений. По формуле (1) проводится проверка эквивалентности индуктивности. Если отклонение превышает допустимое (5 % в данном случае), то стоит подобрать значение  $q$  такое, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{|L_{\text{табл.}} - L_{\text{экв.}}|}{L_{\text{табл.}}} \cdot 100 \% < 5 \% \quad (6)$$

3) Расчёт эквивалентного внешнего диаметра оплётки аналогично пункту 1:

$$D_{\text{опл. внеш. экв.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (S_{\text{опл. реал.}} + S_{D, \text{опл. внут. экв.}})}{\pi}} \quad (7)$$

По формуле (3) проводится расчёт эквивалентной площади сечения оплётки и определение отклонения, если отклонение выше допустимого, значение  $D_{\text{опл. внеш. экв.}}$  подбирается до выполнения условия:

$$\frac{|S_{\text{опл. реал.}} - S_{\text{опл. экв.}}|}{S_{\text{опл. реал.}}} \cdot 100 \% < 5 \% \quad (8)$$

4) В связи с намоткой проволок оплётки по спирали их реальная длина несколько больше, чем длина центральной жилы. Для этого случая, авторами был введён коэффициент спиральности  $\chi$ . В случае, если отклонение эквивалентного сопротивления жилы от реального недопустимо больше принятого (при отсутствии других источников погрешности), коэффициент можно применять и к жиле. Расчёт коэффициента спиральности проволок оплётки проводится, исходя из среднего диаметра по толщине оплётки реального кабеля и шага намотки (рис. 3).

$$l_{\text{пров.}} = \sqrt{(\pi \cdot D_{\text{опл. внут.}})^2 + k_{\text{пров.}}^2}, \chi = \frac{l}{k} \quad (9)$$

5) Расчёт эквивалентного погонного сопротивления [3]:

$$R_{\text{жил. экв.}} = \frac{\rho \cdot h}{S_{\text{жил. экв.}}}; R_{\text{опл. экв.}} = \frac{\rho \cdot h \cdot \chi}{S_{\text{опл. экв.}}}; R_{\Sigma \text{ экв.}} = R_{\text{жил. экв.}} + R_{\text{опл. экв.}} \quad (10)$$

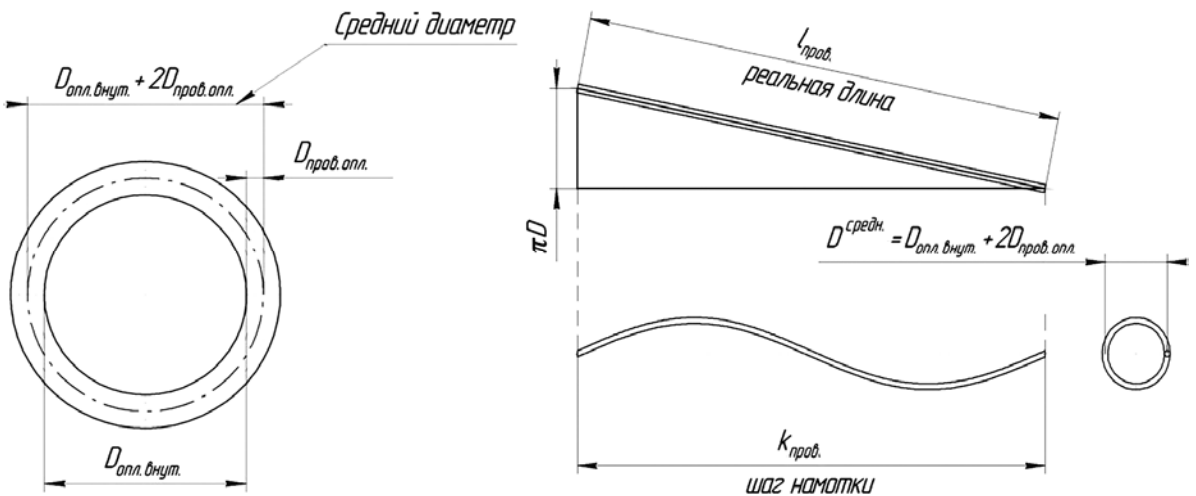


Рис. 3. Средние диаметры намотки оплётки и определение реальной длины спиральной жилы

	КИМЭПМ реальный	КИМЭПМ эквивалентный	КИМЭП-К реальный	КИМЭП-К эквивалентный
$d_{\text{жилы}}, \text{ мм}$	0,57	0,48	1,35	0,78
$d_{\text{изол. жилы}}, \text{ мм}$	1,15	1,32	2,00	1,36
$d_{\text{внеш. опл.}}, \text{ мм}$	1,87	1,54	2,80	1,67
$S_{\text{жилы}}, \text{ мм}^2$	0,178	0,181	0,473	0,478
$S_{\text{оплет}}, \text{ мм}^2$	0,492	0,494	0,739	0,737
$R_{\text{эквив}}, \text{ Ом/м}$	0,22	0,21	0,10	0,097
$L_{\text{эквив}}, \text{ мкГ/м}$	0,20	0,20	0,11	0,11

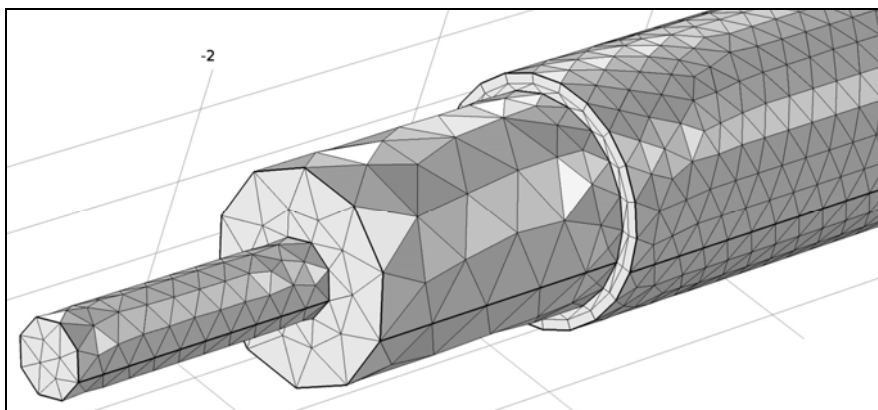


Рис. 4. Модель КИМЭПМ с эквивалентной геометрией

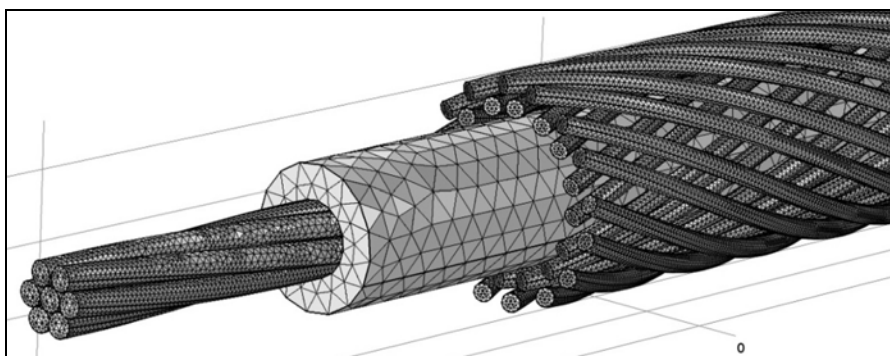


Рис. 5. Модель КИМЭПМ, приближенная к реальной конструкции

определение отклонений:

$$\left| \frac{R_{\Sigma \text{ реал. пров.}} - R_{\Sigma \text{ экв. пров.}}}{R_{\Sigma \text{ реал. пров.}}} \right| \cdot 100 \% < 5 \% . \quad (11)$$

6) В случае превышения допустимого отклонения по пункту 6 корректируются значения по пунктам 3 и 4.

На примере коаксиальных импульсных кабелей КИМЭПМ и КИМЭП-К после перерасчета получены следующие значения параметров моделей (см. таблицу) [4]:

Отклонения электрических характеристик эквивалентных моделей от реального кабеля в результате применения алгоритма не превысили 5 %. Количество конечных элементов в эквивалентной мо-

дели кабеля КИМЭПМ длиной в 1 см, построенной по полученным характеристикам (рис. 4), составляет  $\approx 15000$  шт. Для сравнения, при построении точной модели (рис. 5), количество конечных элементов  $\approx 80000$  шт.

Модель с полученными параметрами успешно применима в расчетах, где необходимо получить картину распределения токов по объему, а также картину нагрева проводника. Очевидным недостатком в данном случае является несоответствие толщины эквивалентной изоляции и реальной модели. Возможные решения оговариваются далее. Еще один недостаток – несоответствие геометрии полученной модели реальному кабелю. При необходимости, алгоритм изменяется таким образом, что жила заменяется полым цилиндром с внешним диаметром, соот-

ветствующим максимальному диаметру жилы. Вычитанием внутренней полости достигается эквивалентность проводимости по жиле, дальнейший алгоритм расчета остается без изменений. Полученная таким образом модель с некоторой удовлетворительной для оценочных расчетов точностью соответствует реальному кабелю.

### Случаи граничных условий и поправочных коэффициентов

Далее рассматриваются случаи, при которых может возникнуть необходимость дополнить модель эквивалентной геометрии дополнительными граничными условиями или поправочными коэффициентами.

Поправочный коэффициент, например, вводится в параметр электропрочности изоляции эквивалента, в случае если необходимо получить расчет возникновения электрического пробоя, а ее толщина недопустимо отлична от реальной.

Более сложная задача – учет реакции кабеля на внешние электромагнитные поля. Для этого необходимо рассмотреть особенности поведения сетчатых экранов в полях.

Согласно [5], для магнитного поля, при низких частотах, при которых нет поверхностного эффекта, сетчатый экран можно считать эквивалентным экрану со сплошными стенками толщиной  $d = 2r_i$  (где  $r_i$  – радиус проволоки экрана) с проводимостью, уменьшенной в отношении коэффициента  $\varepsilon$  заполнения стенки сетчатого экрана проволокой.

При высоких частотах у сплошных экранов коэффициент экранирования асимптотически стремится к нулю, а у сетчатых в этих условиях коэффициент экранирования стремится к постоянной, отличной от нуля величине. В итоге, предельная величина, к которой стремится коэффициент экранирования в случае высоких частот:

$$S_{\min} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} S = \frac{a}{\pi D} \ln \frac{a}{2\pi r_i}, \quad (12)$$

где  $D$  – диаметр экранируемой зоны,  $a$  – расстояние между проволоками сетки экрана, при условии, что дан коэффициент заполнения стенки сетчатого экрана:  $a = \pi r_i / 2\varepsilon$ .

Для электрического поля коэффициент экранирования остается постоянным при любой частоте, и, при условии  $D \gg a$ , составляет:

$$S_{\min} = \frac{E_i}{E_a} = \frac{a}{\pi D} \ln \frac{a}{2\pi r_i}, \quad (13)$$

где  $E_i$  – электрическое поле в экранируемой зоне,  $E_a$  – внешнее (помехонесущее) электрическое поле.

Уточним приблизительную частоту возникновения поверхностного эффекта для кабелей КИМЭПМ и КИМЭП-К. Сетчатый экран этих кабе-

лей состоит из алюминиевых проволок с радиусом  $r_i = 0,07$  мм. Для алюминия эквивалентная глубина проникновения выражается соотношением:

$$\delta = 2,75 \sqrt{\frac{1}{f}}, \quad (14)$$

где частота  $f$  указывается в кГц.

Исходя из условия поверхностного эффекта  $r_i < \delta$ , получаем, что приблизительная частота возникновения поверхностного эффекта составляет:

$$f = \frac{2,75^2}{r_i^2} = \frac{7,5625}{r_i^2} = \frac{7,5625}{0,0049} = 1543 \text{ кГц} \approx 1,5 \text{ МГц}. \quad (15)$$

Рассмотрим необходимость введения поправок в модель. Для магнитных полей частотой ниже 1,5 МГц поправочный коэффициент вводится через проводимость, зависящую от коэффициента поверхностной плотности экрана. Для исследуемых кабелей коэффициент поверхностной плотности экрана согласно ТУ составляет не менее 85 %. Данное значение примем без изменений. Следовательно, в случае эквивалентного экрана со сплошными стенками к проводимости необходимо применить понижающий коэффициент  $\varepsilon = 0,85$ . Это справедливо при соблюдении условия  $d = 2r_i = 0,14$  мм (для исследуемых кабелей). У моделей кабелей КИМЭПМ и КИМЭП-К после применения приведенного выше алгоритма расчета цилиндрических сплошных эквивалентов толщина экрана рассчитана так, чтобы сохранить погонное сопротивление модели приближенным к реальному кабелю, и составляет соответственно 0,11 мм и 0,155 мм. Максимальное отклонение от условия  $d = 0,14$  мм составляет – 22 % для КИМЭПМ и +11 % для КИМЭП-К. Проводимость – величина обратная сопротивлению, сопротивление обратно пропорционально площади сечения проводника, площадь прямо пропорциональна квадрату диаметра (для круглой проволоки). Следовательно, проводимость прямо пропорциональна квадрату диаметра проволоки или площади сечения проводника. Допускаем, таким образом, что для модели кабеля КИМЭПМ при частотах до 1,5 МГц поправочный коэффициент не вводится, так как толщина экрана автоматически вносит уменьшающую поправку в проводимость и укладывается в разумные пределы погрешности. Для модели кабеля КИМЭП-К необходимо будет провести расчет поправки, так как толщина экрана не соответствует условию  $d = 2r_i$ . В данной статье этот расчет не рассматривается.

Для частот свыше 1,5 МГц моделирование магнитных полей с применением полученных моделей кабелей, очевидно, не представляется возможным, поскольку с высокой долей вероятности (расчетный эксперимент не проводился ввиду отсутствия такой

необходимости на момент написания статьи) расчетный программный комплекс выдаст некорректную картину экранирования. Однако наличие формулы предельного значения коэффициента экранирования позволяет ввести граничное условие, при котором в экранируемой области модели кабеля полностью игнорируются внешние поля, и создается магнитное поле  $H_i = S \cdot H_a$  в области экранирования. В некоторых оценочных расчетах это допущение может дать необходимый результат.

Такое же допущение можно применить и для моделирования электрических полей при любых частотах. В этом случае применяется аналогичное граничное условие с электрическим полем  $E_i = S \cdot E_a$ .

### Заключение

В работе рассмотрены варианты построения моделей экранированных кабелей на примере коаксиальных кабелей КИМЭПМ и КИМЭП-К, выделены основные достоинства и недостатки. Введено понятие электрической эквивалентности, когда электрические параметры эквивалентной модели кабеля (сопротивление, индуктивность, при необходимости – ёмкость) близки к параметрам реального кабеля с принятыми допустимыми отклонениями и упрощениями. Показан алгоритм вычисления приближенных конструктивных параметров, необходимых для построения эквивалентной модели, проведено сравнение количества конечных элементов точной и эквивалентной моделей. Проведено сравнение электрических параметров реального кабеля с параметрами, полученными с применением алгоритма.

Приведенный математический алгоритм позволяет получить конструктивные параметры для построения эквивалентной модели кабеля с сохранением основных электрических параметров: погонных индуктивности и сопротивления. Алгоритм применим для широкого спектра кабелей с многопроводной жилой и оплёткой; ускоряет и оптимизирует процесс трёхмерных расчётов, выполняемых инже-

нером в процессе проектирования и разработки изделия для определения вероятного диапазона значений его ключевых параметров и поиска режимов проведения необходимых испытаний. Созданные при помощи алгоритма модели легко воспроизводимы в различных расчетных программах, поскольку содержат, в основном, изменение геометрии без изменения свойств материалов.

В работе также рассмотрены примеры расширения модели путем комбинирования с методом введения поправочных коэффициентов и внесения дополнительных граничных условий.

Точность создаваемых моделей является достаточной для проведения многих оценочных расчетов на этапе проектирования и разработки. Основным недостатком рассмотренного метода является геометрическое несовпадение размеров конструкции кабеля, и необходимость введения допущений для изоляции и сетчатых экранов при воздействии полей.

Алгоритм и его вариации применяются авторами в процессе проектирования вариантов устройств. Применение алгоритма на имеющейся вычислительной базе позволяет экономить до 30 % времени.

### Литература

1. Яковенко Р. В. Метод оптимизации электрически эквивалентной 3D-модели кабелей для оценочных расчетов характеристик устройств // XXII Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: материалы докладов. 2017. Т. 1. С. 158–164.
2. Цейтлин Л. А., Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей // Ленинград: Энергоатомиздат, 1986.
3. Максимов Д. Г. Курс электротехники // М.: Воениздат МО СССР, 1958.
4. ТУ 16-505.955-76 Кабели импульсные монтажные с алюминиевыми жилами и экраном.
5. Каден Г. Электромагнитные экраны // М.: Госэнергоиздат, 1957.