

УДК 621.311

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАБЕЛЯ

**А. А. КАПАНСКИЙ, Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Как правило, основу городских электрических сетей среднего напряжения, питающих жилые и промышленные здания, составляют кабельные линии, протяженность которых с каждым годом непрерывно увеличивается. Силовые кабели, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, занимают первое место в структуре выпуска всех типов кабельных изделий [1].

В процессе эксплуатации происходит нагрев силового кабеля из-за потерь активной мощности в его жиле и других элементах. Предельно допустимые токовые нагрузки зависят от допустимой температуры нагрева кабеля или провода в процессе эксплуатации, при которой изоляция не будет подвергаться ускоренному старению или снижению механической прочности и эластичности [2]. Под допустимой температурой нагрева кабеля понимают температуру токопроводящей жилы, при которой нагрев изоляции не будет превышать значений, установленных ПУЭ. Тепловой расчет кабеля сводится к определению температуры токоведущей жилы с учетом потерь тепловой энергии во всех его элементах (основная изоляция, защитная оболочка, броня, окружающая среда) [3].

В процессе проведения теплотехнических расчетов по определению температуры кабеля, находящегося под нагрузкой, необходимо уделить особое внимание расчету тепловых сопротивлений. Величина теплового сопротивления изоляции зависит как от геометрических размеров кабеля, так и его конструкции. Для математического описания конструкции кабеля в расчетах теплового сопротивления вводится параметр «геометрический фактор», который для большинства типов кабелей необходимо определять весьма трудоемким способом. Расчет теплового сопротивления окружающей среды является достаточно сложной задачей, поскольку для корректного описания математической модели необходимо учитывать множество факторов (число кабелей, место и способ прокладки, характер нагрузки и др.). Для нахождения значений тепловых сопротивлений кабеля зачастую приходится вычислять искомые величины итерационным путем, что доставляет значительные неудобства в скорости и качестве расчета.

Рассмотренные выше требования показывают сложность проведения вычислений теплового сопротивления кабеля в целом. Инженерные расчеты без использования ЭВМ могут приводить к погрешностям при определении теплового сопротивления кабеля, что в свою очередь приводит к погрешности в определении допустимой токовой нагрузки. В связи с этим ставится задача разработки программного обеспечения, позволяющего без значительных затрат труда производить расчет теплового сопротивления элементов кабеля и окружающей среды.

### Компьютерная программа «Thermal Resistance»

В рамках решения поставленной задачи в соответствии с методикой расчета, приведенной в ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009, на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ

им. П. О. Сухого авторами была разработана компьютерная программа «Thermal resistance» (тепловое сопротивление), позволяющая производить расчет внутреннего и внешнего тепловых сопротивлений кабелей, проложенных на воздухе, в каналах и земле. Внешний вид главного окна разработанной программы представлен на рис. 1.

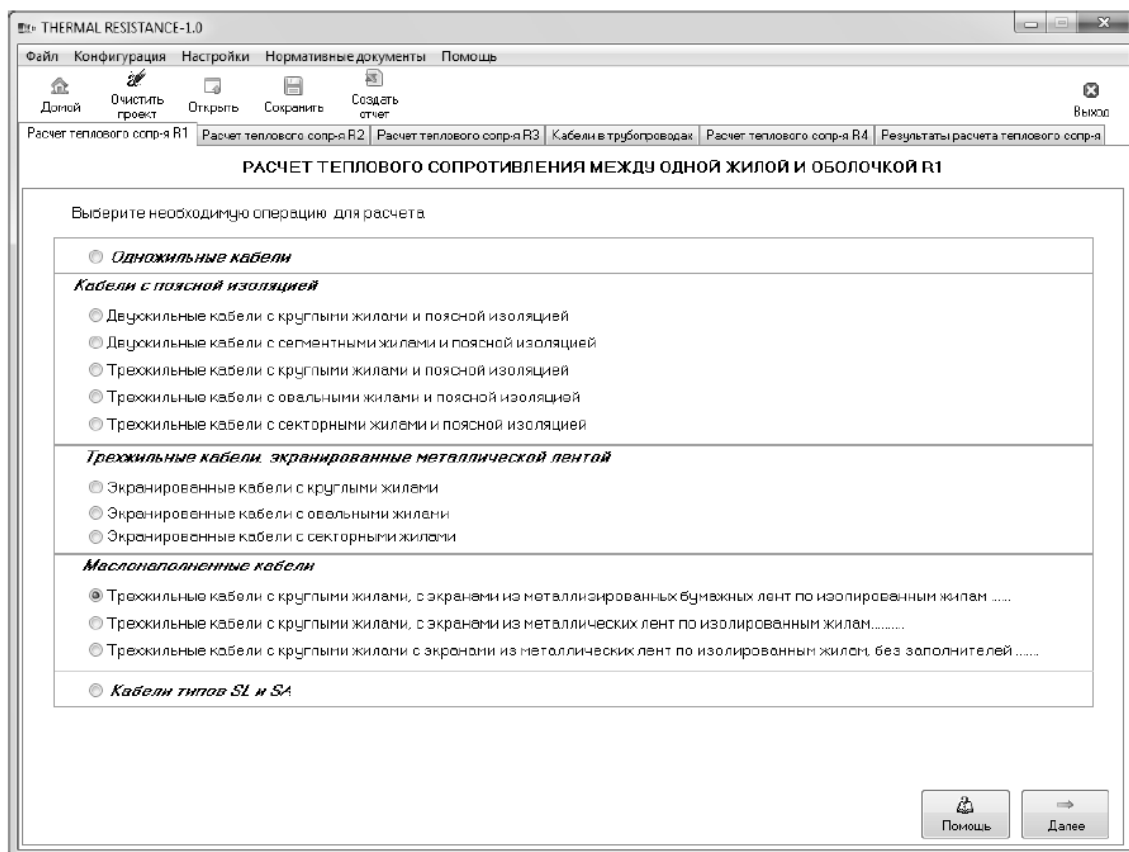


Рис. 1. Внешний вид главного окна компьютерной программы «Thermal resistance»

Компьютерная программа «Thermal Resistance» предназначена для решения следующих задач:

- расчета теплового и термического сопротивления на фазу между жилой и оболочкой;
- расчета теплового и термического сопротивления между оболочкой и броней;
- расчета теплового и термического сопротивления наружного защитного покрытия;
- расчета теплового и термического сопротивления окружающей среды;
- расчета теплового и термического сопротивления между кабелем и каналом (трубой);
- расчета теплового и термического сопротивления канала (трубы);
- расчета внешнего теплового и термического сопротивления среды, окружающей канал (трубу).

Расчетная часть программы написана на языке Delphi диалекта Object Pascal. В большинстве случаев расчет теплового сопротивления основной изоляции, защитной оболочки, брони и окружающей среды в программе производится после того, как выполнилось событие нажатия кнопки «Выполнить». После выполнения данного события программа выводит сообщение о результатах расчета и предлагает пользователю

лю перейти к выполнению расчета теплового сопротивления оставшихся элементов, составляющих кабель. Если все вычисления произведены, осуществляется переход на вкладку «Результаты расчета теплового сопротивления», где сведены результаты всех предшествующих расчетов и значение результирующего теплового сопротивления, составляющее сумму тепловых сопротивлений отдельных элементов кабеля.

Значения вводимых исходных данных кабеля автоматически определяются программой как глобальные, что позволяет опустить процедуру повторного ввода тех или иных параметров в дальнейших расчетах.

В разработанной программе предусмотрена база данных удельных тепловых сопротивлений материалов кабеля, созданная при помощи средств пакета MS Access. Она включает в себя более двадцати единиц различных изоляционных материалов и защитных покрытий, а также предусматривает возможность добавления и удаления собственных данных. На рис. 2 представлено меню этой базы данных.

Тип материала	Удельное тепловое сопротивление, Кн/Вт
<b>I Изоляционные материалы:</b>	
Бумажная изоляция в кабелях с пропитанной изоляцией	6
Бумажная изоляция в маслонаполненных кабелях	5
Бумажная изоляция в кабелях с внешним давлением газа	5,5
Бумажная изоляция в кабелях с внутренним давлением газа: с предварительной пропиткой	5,5
Бумажная изоляция в кабелях с внутренним давлением газа: с вязкой пропиткой	1
Полиэтилен (PE)	3,5
Сшитый полиэтилен (XLPE)	3,5
II Полипропилен (PPL)	5,5
Поливинилхлоридный пластикат (PVC) для кабелей на напряжение до 3 кВ включительно	5
Поливинилхлоридный пластикат (PVC) для кабелей на напряжение свыше 3 кВ	5
Бутилкаучук	5
Резина	5
<b>Защитные покрытия</b>	
Композитированный джут и волокнистые материалы	6
Резиновое покрытие, наложенное послойно	6
Полихлоропрен	5,5
ПЕХ для кабелей на напряжение до 35 кВ включительно	5
ПЕХ для кабелей на напряжение свыше 35 кВ	5
Покрытие из поливинилхлоридного пластиката и битума по гофрированной алюминиевой оболочке	6
Полиэтилен (PE)	3,5
Материалы, используемые в конструкции каналов	0
Бетон	1
Волокна	4,0

Рис. 2. Внешний вид меню базы данных удельного теплового сопротивления материалов кабеля

На рис. 3 показана схема меню программы. Оно имеет древовидную структуру, реализованную таким образом, что пользователь затрачивает минимум времени при вводе исходных данных.

Для удобства работы предусмотрена возможность сохранения значений, вносимых в поля ввода программы при ее открытии. Такая функция позволяет ускорить процесс набора исходных данных при незначительных изменениях параметров кабеля.

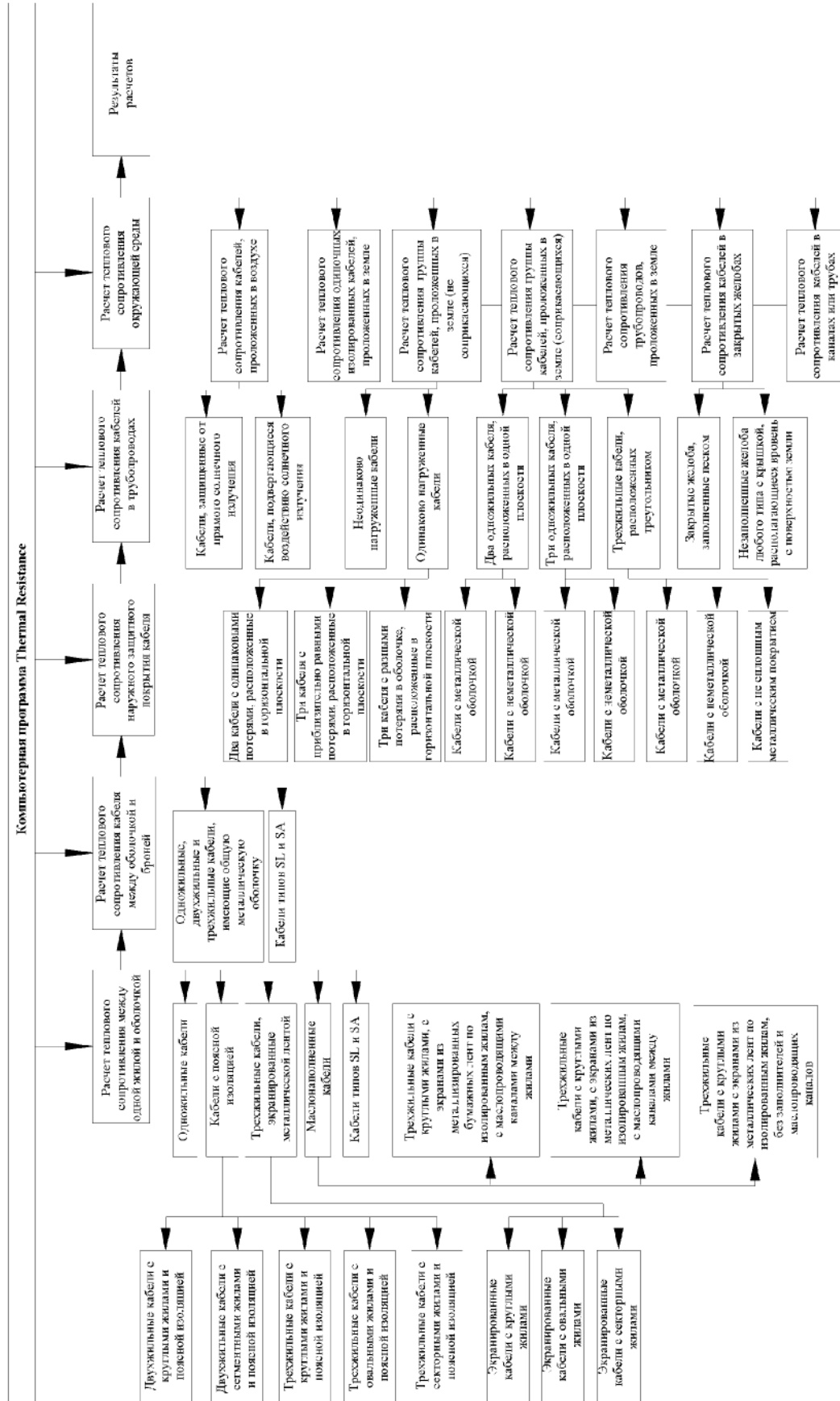


Рис. 3. Структурная схема программы «Thermal Resistance»

В разработанной программе можно как сохранять, так и открывать ранее введенные параметры кабеля. Настройки программы позволяют оперировать цветовой схемой интерфейса и точностью выводимых результатов. В разделе «Нормативные документы» сведены основные стандарты, необходимые для выполнения расчетов по определению номинальных токовых нагрузок кабелей и тепловых сопротивлений.

При выполнении команды «Создать отчет» происходит вывод данных в электронную таблицу для программы MS Excel. На рис. 4 представлен пример сформированного отчета по расчету теплового сопротивления трехжильного кабеля с секторными жилами ААШв 3х240-10.

<i>Результаты расчета теплового и термического сопротивления кабеля между одной жилой и оболочкой</i>	
Результаты расчета теплового (термического) сопротивления трехжильных кабелей с секторными жилами и поясной изоляцией	
Параметры	Значения
<b>Термическое сопротивление T1, К·м/Вт</b>	<b>0,5737</b>
<b>Тепловое сопротивление R1, К/Вт</b>	<b>0,0006</b>
<u>Исходные данные:</u>	
Наружный диаметр поясной изоляции, мм	43
Радиус окружности, описанной вокруг жил, мм	18
Диаметр круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и степенью уплотнения, что и фасонная жила, мм	17,5
Толщина изоляции между жилами, мм	6
Удельное тепловое сопротивление изоляции, К·м/Вт	6
Длина кабеля, м	1000

Рис. 4. Пример формирования отчета о результатах расчетов программы

Сформированный отчет состоит из таблиц с исходными данными и результатами расчетов тепловых и термических сопротивлений, находящихся на пяти листах программы MS Excel.

Основные преимущества компьютерной программы «Thermal Resistance» – это точность и оперативность производимых вычислений, а также простота пользовательского интерфейса.

В соответствии с [4] формулы, использованные при написании программы, являются «достаточно точными и в то же время позволяют варьировать некоторые важные параметры». Эти параметры можно разделить на группы:

а) параметры, относящиеся к конструкции кабеля (например, удельное тепловое сопротивление изоляционного материала), для которых были выбраны характерные значения, основанные на опубликованных работах;

б) параметры, относящиеся к условиям окружающей среды, которые могут быть очень разнообразны, выбор этих параметров зависит от страны, в которой используются или должны использоваться кабели;

в) параметры, которые принимают по соглашению между изготовителем и потребителем и которые касаются запаса надежности работы кабеля (например, максимальная температура жилы).

#### **Области применения программы «Thermal Resistance»**

Можно выделить две основные области применения программы «Thermal Resistance»: при проектировании систем электроснабжения и при эксплуатации ка-

бельных линий. В первом случае программа может быть использована для окончательной оценки нагрузочной способности силового кабеля, выбранного в проекте, путем расчета температуры жилы в соответствии с [2] по формуле

$$\theta = P \sum_i R_i, \quad (1)$$

где  $P$  – суммарные потери активной мощности в кабеле в режиме аварийных перегрузок;  $R_i$  – тепловые сопротивления, рассчитанные программой «Thermal Resistance».

Если значение величины  $\theta$ , рассчитанное по (1), выше максимально допустимой температуры изоляции жилы для выбранного кабеля, то в процессе проектирования допущены ошибки. Если же это значение ниже максимально допустимого на 20 °С и более, то кабель будет существенно недогружен, что также свидетельствует о недоработках в проекте.

Отметим, что оценка стойкости кабеля к токам короткого замыкания производится, как правило, на основе термического импульса [5]. Эта методика базируется на тепловом расчете кабеля и максимально упрощена для выполнения вычислений с помощью калькулятора. С учетом развития современных средств вычислений ее можно признать устаревшей и пользоваться предлагаемой программой «Thermal Resistance» в совокупности с математической моделью тепловых процессов [3].

На этапе эксплуатации программа «Thermal Resistance» может быть использована в составе программного обеспечения устройства для диагностирования силового кабеля по тепловым параметрам [6].

### Заключение

Компьютерная программа «Thermal resistance», разработанная на основе методики ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009, позволяет автоматизировать процесс расчета тепловых сопротивлений элементов кабеля. Автоматизация расчета, учитывающая различные условия прокладки кабеля, позволит инженеру обоснованно производить выбор токоведущих частей на стадии проектирования и при эксплуатации систем электроснабжения.

Разработанная программа может быть применена для автоматизации производственных расчетов на предприятиях, в проектных организациях, а также в рамках учебного процесса студентов вузов.

Гибкость пользовательского интерфейса, производительность и адаптивность позволяет в дальнейшем рассматривать вопрос о развитии функциональных возможностей программы.

### Литература

1. Силовые кабели на напряжение 10–500 кВ: история развития и перспективы / Г. И. Мещанов [и др.] // Наука и жизнь. – 2006. – № 3. – С. 18–24.
2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1–2009 «Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1–1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100%-й коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения».
3. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 25–34.
4. ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2–1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления».

- 
5. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск : Выш. шк., 1988. – 357 с.
  6. Патент РБ 7281, МПК (2011) H02H6/00. Устройство для выявления аномального нагрева одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, Д. М. Лось. – Заявл. 03.11.2010 ; опубл. 30.06.2011. – 4 с.

*Получено 28.10.2013 г.*