

УДК 530.1

И. С. Елкин, М. В. Шлейкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ПРОВОДНИКОВ

В сложных электрических системах, состоящих из нескольких последовательно соединенных проводников, находящихся в предельных или экстремальных условиях и состояниях, при которых вероятность их разрушения является очень высокой, актуальным является установление критических условий состояния и место разрушения в такой системе проводников.

Основная цель исследований – изучение процессов разрушения в системе из двух и более проводников при критических значениях электрического тока и температурного режима.

Возможными факторами, влияющими на состояние проводников при протекании электрического тока, являются: тепловые и электрические процессы внутри проводника, на границе раздела проводник-окружающая среда; в окружающей среде вблизи проводников; окислительно-восстановительные процессы на поверхности проводника; контактная разность потенциалов в местах соединения проводников, электроиндукционные процессы и др.

Рассмотрим систему, состоящую из двух одинаковых проводников, но находящихся при различных тепловых условиях.

Для описания состояния такой системы используем известные законы: закон Ома, закон Джоуля–Ленца и закон Фурье, закон Стефана–Больцмана, а также ряд других законов и закономерностей, описывающие изменение тепловых и электрических свойств системы [1, 2, 3]. Общее напряжение в системе из двух проводников будем считать постоянным:

$$U = U_1 + U_2 = \text{const}.$$

Тогда уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$Q = Q_c + Q_\chi + Q_\sigma$$

или

$$I^2 R \Delta t = cm \Delta T + \frac{2\pi\chi\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T - T_0) \Delta t + \sigma(T - T_0)^4 s \Delta t$$

где m, ℓ, c, R – масса, длина, удельная теплоемкость материала, сопротивление проводника, соответственно; r_1, r_2 – радиус проводника и расстояние от проводника до точки измерения температуры, соответственно; χ – температурный коэффициент материала проводника; $U = IR$ – падение напряжения на концах проводника; χ – коэффициент теплопроводности изолирующего

материала проводника или окружающей среды; $T, \Delta T$ – температура проводника и ее изменение в процессе нагревания за время Δt , соответственно; T_0 – температура окружающей среды, комнатная температура.

Решая систему уравнений численным способом, определяем зависимости $U_i = f(t)$, $T_i = f(t)$, $Q_i = f(t)$, $R_i = f(t, T)$ и др. В первом приближении при малом изменении температуры можно принять, что χ, c не зависят от температуры, а теплоемкость окружающей среды стремиться к бесконечности и, соответственно, $T_0 = \text{const}$.

Аналогично, уравнения теплового состояния проводников можно записать для системы, состоящей из N проводников, находящихся в различных тепловых условиях и обладающих различными электрическими свойствами.

Вследствие различности тепловых свойств изоляционных материалов проводников, тепловые потоки у проводников будут различны, что приводит к разнице температур проводников и их сопротивлений в процессе нагревания при их начальном равенстве, и, соответственно, приводит к разнице падений напряжения на концах проводника. При изначально одинаковых материалах и геометрических параметрах проводников, вследствие различия тепловых условий нахождения проводников, они будут проявлять различия в протекании токов.

Особенностью процессов в таких системах является то, что в процессе протекания тока балансировка теплоэлектрических параметров на одном из проводников протекает за счет теплового процесса на втором проводнике. Протекающие процессы в системе можно описать так: на проводнике, при протекании электрического тока, в соответствии с законом Джоуля–Ленца, начинает выделяться тепловая энергия. Тепло, выделяемое на проводнике за счет протекания электрического тока, идет на изменение температуры проводника, тепловое излучение энергии в окружающую среду (по закону Стефана–Больцмана), теплоперенос по закону тепловодности от проводника в окружающую среду (по закону теплопроводности Фурье). Изменение теплового состояния проводника, теплового режима на одном проводнике приводит к изменению силы тока в системе, падения напряжения на концах проводника и, соответственно, отражается на тепловых параметрах второго проводника, что и приводит к соответствующему из-

менению сопротивления и напряжения на втором проводнике и, соответственно, на проводнике. По этому механизму в системе при включении тока наблюдается автобалансировка состояния проводника главным образом за счет равновесного теплового излучения проводниками.

Нами была разработана программа на основе Microsoft Excel, которая позволяет смоделировать процессы в подобной системе и предсказать параметры системы в любой момент времени. Результаты некоторых расчетов приведены на рис. 1 и 2.

Для проверки полученных теоретических выводов был проведен эксперимент на разработанной установке. Установка для измерений состояла из двух одинаковых последовательно соединенных проводников, находящиеся в различных тепловых условиях, вольтметров для измерения падения напряжения на каждом участке, амперметра и мультиметров для измерения температуры в различных точках системы. С помощью приборов

около 95% при критическом значении силы тока или плотности тока в системе.

На втором интервале происходит стабилизация всех электрических и тепловых процессов в системе, изменение температуры проводников прекращается, большая часть тепловой энергии идет на тепловое излучение, протекающее при большой температуре и больших значениях плотности тока.

Исходное предположение, что сопротивление (напряжение) на одном участке изменяется быстрее, чем на другом, подтвердилось (рис. 1) – первый интервал.

В результате протекания тепловых процессов на различных участниках возникает различные падения напряжения, определяемые размерами проводников с одной стороны, и различием интенсивности тепловых процессов – с другой стороны.

Некоторое несоответствие экспериментальных

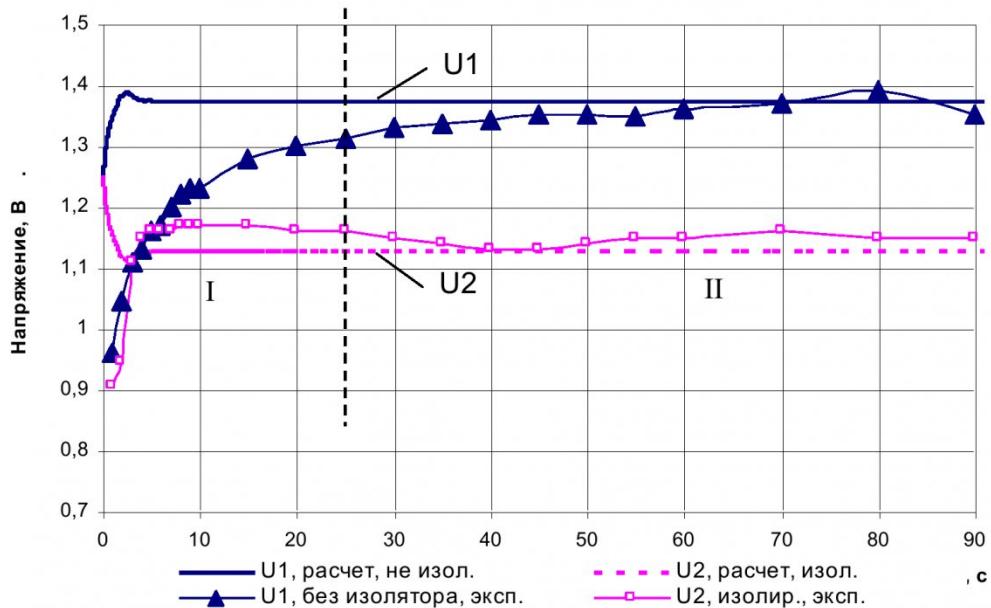


Рис. 1. Зависимость напряжения на отдельных участках от времени

проводилось измерение силы тока, напряжения и температуры от времени. Результаты лабораторных исследований представлены на рис. 1 и 2.

Весь процесс нагревания можно разделить по времени на два основных интервала:

I – не устойчивое, интенсивное изменение параметров системы;

II – стабилизация, переход в тепловое равновесное состояние системы.

На первом этапе, при включении и протекании электрического тока в течение нескольких первых секунд происходит резкое возрастание тока от 0 до максимального значения вследствие электрических процессов в системе. Большая часть энергии тока на этом интервале так же идет на нагревание проводника. На этом интервале вероятность разрушения проводников составляет

графиков и теоретических зависимостей объясняется тем, что не были учтены еще ряд процессов протекающих в данной системе, например, электрические явления в системе, конвективный перенос тепла, окислительно-восстановительная реакция горения проводника, перераспределение тепла вдоль проводника и др.

Отметим, что при превышении определенного порогового значения силы тока проводник разрушался (сгорал), причем именно на оголенном участке, а не в изоляторе, как предполагалось ранее. Это можно объяснить тем, что изолятор в данном случае является теплоотводом, распределяющим тепло от проводника на большую площадь, и, в соответствии с законом Фурье, теплообмен с окружающей средой будет происходить быстрее.

По результатам исследований было установлено

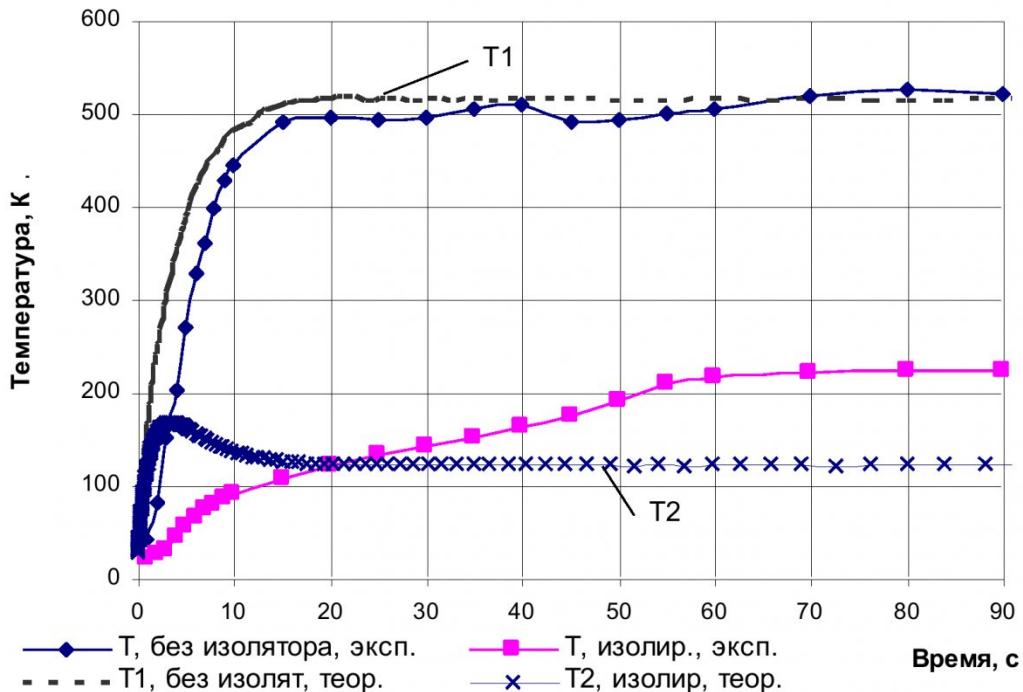


Рис. 2. Зависимость температуры от времени для системы проводников

лено:

1. Тепловые процессы значительно зависят от состояния поверхности проводников, тепловых свойств окружающей среды и изоляционных материалов, дефектов в кристаллической структуре проводников;
2. Разрушение, перегорание проводника происходит в первые секунды после включения питания и зависит, главным образом, от плотности тока;
3. Если перегорание не произошло, то система переходит в равновесное устойчивое состояние, температура и напряжение стабилизируются;
4. Воздух обладает самой низкой теплопроводностью, поэтому проводник, находящийся в

воздушной среде, будет сильнее нагреваться, чем проводник, изолированный от окружающей среды.

Тепловые процессы, протекающие в сложных системах, играют важную роль, так как именно они определяют долговечность и исправность работы сложных систем. С другой стороны, система из двух последовательных проводников, построенная по рассмотренному типу, может быть использована для разработки системы контроля, в которой один из проводников играет роль датчика, а другой роль детектора. Или системы, в которой один из проводников играет роль термостата, снижающего тепловую нагрузку на второй проводник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 5-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2005. – 720 с.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008.— 560 с.
3. Дырдин, В. В. Физика. Молекулярная физика и термодинамика. Комплекс К-402.2. : методические указания по самостоятельной работе для подготовки к выполнению лабораторных работ по разделу физики «Молекулярная физика и термодинамика» для студентов всех специальностей / В. В. Дырдин, И. С. Елкин, А. А. Мальшин. – Кемерово: ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т», 2008. – 36 с.
4. http://www.domastroim.su/articles/electro/electro_682.html
5. <http://electricvdome.ru/montaj-electroprivodki/raschet-secheniya-provoda-kabelya.html>

Авторы статьи:

Елкин
Иван Сергеевич
- канд. техн. наук, доц. каф. физики
КузГТУ, e-mail: jelkin@mail.ru

Шлейкин
Михаил Владимирович
- студент ИХНТ КузГТУ,
тел. 8 951 606 74 11