

6. SIGMATEST 2.069. Измерение электропроводимости [Электронный ресурс] / Institut Dr. Foerster ; дизайн Weber ebusiness services GmbH. - Электрон. дан. - СПб. : Institut Dr. Foerster, 2010. - Режим доступа: <http://www.foerstergroup.ru/Portativnyye-defektoskopy-i-izmeriteli.168.0.html>, свободный.
7. КИМ-2М. Портативный импульсный коэрцитиметр [Электронный ресурс] / НПЦ «Крокус». - Электрон. дан. - Ногинск : НПЦ «Крокус», 2003. - Режим доступа: <http://www.kropus.ru/product/magnetic/kim2.htm>, свободный.
8. Толщиномер покрытий ТП-44 [Электронный ресурс] / ООО НПФ «Ультракон». - Электрон. дан. - К. : ООО НПФ «Ультракон», 2007. - Режим доступа: <http://ultracon.com.ua/index.php?page=167>, свободный.
9. ГОСТ 11878-66 Сталь аустенитная. Методы определения содержания альфа-фазы [Текст]. - Введ. 1966-15-03. - М. : Гос. комитет стандартов совета министров Союза ССР : Изд-во стандартов, 1977. - 5 с.
10. Sandomirsky S.G. Magnetic testing of structure of the cast-iron products: possibilities and results [Electronic resource] / S.G. Sandomirsky ; RSNTTD. — Electronic data (265 kbytes). - Moscow : RSNTTD, 2010. - Mode of access: [http://www.idspekt.ru/10\\_EC-NDT/reports/1\\_01\\_21.pdf](http://www.idspekt.ru/10_EC-NDT/reports/1_01_21.pdf), free.
11. Магнетомеханический толщиномер (цифровой) МикроТест 7 [Электронный ресурс] / ElektroPhysik - Украина. - Электрон. дан. - [Б. м.] : Девайсиз Групп Украина, 2009. - Режим доступа: <http://elektrophysik.com.ua/load/8-1-0-4>, свободный.

УДК 001.891:65.011.56

# ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

**А. Н. Толстикова\***

E-mail: [tols-alex@yandex.ru](mailto:tols-alex@yandex.ru)

**Н. Г. Толстикова**

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой

Кафедра информатики

Харьковский гуманитарно-технический институт

ул. Кандаурова, 2, г. Харьков, 61093

**И. А. Макрушан**

Ассистент\*

\*Кафедра информационно-управляющих систем

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166

*Описано математичну модель теплового стану контактної дроту, досліджені її параметри. Показано перспективність пристрою контролю температури дроту, заснованого на вирішенні рівняння теплового балансу, в інформаційно-управляючій системі електротранспорту*

*Ключові слова: інформаційно-управляюча система, пристрій контролю*

*Описана математическая модель теплового состояния контактного провода, исследованы ее параметры. Показана перспективность устройства контроля температуры провода, основанного на решении уравнения теплового баланса, в информационно-управляющей системе электротранспорта*

*Ключевые слова: информационно-управляющая система, устройство контроля*

*The mathematical model of the thermal state of the contact wire have been described and its parameters are investigated. The promising device for temperature control wires, based on the solution of the equation to the heat balance in the information management system Electric*

*Keywords: informative-managing system, device of control*

## 1. Введение

Устройства контроля являются частью информационно-управляющей системы электротранспорта, поэтому создание средств температурного контроля и защиты контактного провода (КП) является важной задачей.

Суть в том, что нагрев КП свыше допустимой температуры, вызываемый длительными перегрузками и короткими замыканиями (КЗ), приводит к потере механической прочности КП, что ведет к аварии электрической сети. Существующие устройства контроля и защиты контактной сети (КС) не обеспечивают в полной мере надежной защиты КС, т.к. они не сраба-

тывают при малых токах КЗ в КС, а также приводят к неоправданным отключениям сети при неопасных для нее кратковременных бросках тока.

Для создания эффективного устройства контроля и защиты КП от перегрева, необходимо воспользоваться вероятно-статистическими методами, учитывающими случайный характер тяговой нагрузки, или расширить объем контролируемых признаков режима работы, в частности, осуществлять непосредственный контроль температуры КП на участке КС.

**2. Постановка задачи**

Надежным устройством защиты КП было бы такое устройство, которое реагирует на температуру КП, т.е. учитывает тепловой режим работы КС. Термическая защита позволит в значительной степени сблизить противоречивые требования защиты КС от перегрузок и КЗ, т.к. в конечном счете защищает КП от отжига. Поэтому представляет практический интерес создание устройств температурного контроля, основанных на анализе уравнения теплового состояния КП.

**3. Математическая модель теплового состояния контактного провода**

Тепловое состояние КП описывается уравнением теплового баланса [1]:

$$Q = Q_p + Q_{mc} \tag{1}$$

$$d\Theta / dt + K * F * \Theta / (c * m) - I^2 * R / (c * m) = 0 \tag{2}$$

Полученные уравнения используются для анализа процесса нагрева КП. Значительное различие теоретических и экспериментальных данных объясняется тем, что R, c, K являются функциями температуры. Учитывая, что

$$R = \rho_0 * (1 + \alpha * \Theta) * l / S \tag{3}$$

$$C = C_0 * (1 + \beta * \Theta) \tag{4}$$

$$K = K_0 * (1 + \gamma * \Theta) \tag{5}$$

$$t = \Theta + t_0 \tag{6}$$

$$m = \rho * l * S \tag{7}$$

$$F = 1 * b \tag{8}$$

где  $\rho$  – плотность материала КП;  $\alpha, \beta, \gamma$  – температурные коэффициенты удельного электрического сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплоотдачи материала КП), получим

$$d\tau = [c_0 * \rho * S^2 * (1 + \beta * t_0) + c_0 * \rho * S^2 * b * \Theta] * d\Theta / [-K_0 * b * S * \gamma * \Theta^2 + b * (I^2 * \rho_0 * \alpha - K_0 * S * (1 + \gamma * t_0)) * \Theta + I^2 * \rho_0 * (1 + \alpha * t_0)] \tag{9}$$

$$A_1 = c_0 * \rho * S^2 * (1 + \beta * t_0) \tag{10}$$

$$A_2 = c_0 * \rho * S^2 * b \tag{11}$$

$$B_1 = -K_0 * b * S * \gamma \tag{12}$$

$$B_2 = I^2 * \rho_0 * \alpha - K_0 * b * S * (1 + \gamma * t_0) \tag{13}$$

$$B_3 = I^2 * \rho_0 * (1 + \alpha * t_0) \tag{14}$$

$$d\tau = (A_1 + A_2 * \Theta) * d\Theta / (B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3) \tag{15}$$

$$c_u + \tau = A_1 * \ln[B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3] / 2B_1 + (2B_1 * A_2 - A_1 * B_2) * \ln[(2B_1 * \Theta + B_2 - (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) / (2B_1 * \Theta + B_2 + (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2})] / (2B_1 * (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) = f(\Theta) \tag{16}$$

$$c_u = f(\Theta) = A_1 * \ln[B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3] / 2B_1 + (2B_1 * A_2 - A_1 * B_2) * \ln[(2B_1 * \Theta + B_2 - (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) / (2B_1 * \Theta + B_2 - (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2})] / (2B_1 * (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) \tag{17}$$

$$f(\Theta) = \tau + f(\Theta_0), \Theta = f^{-1}[\tau, f(\Theta_0)] \tag{18}$$

Для решения полученного трансцендентного уравнения при различных значениях входящих в него параметров на компьютере с применением численных методов необходимо значительное время, в то время как в эксплуатационных условиях для принятия решения об отключении питания линии нужно примерно 20–30с. при использовании вычислительной техники, чтобы не произошел неконтролируемый отжиг контактного провода. Поэтому с целью упрощения математической модели теплового состояния контактного провода нужно провести исследование ее параметров.

Функции  $\rho(t)$  и  $c(t)$  в температурном диапазоне от 0 до 150°С являются линейными и имеют вид (для контактных проводов марок МФ–100 и А–185):

$$\rho_{c_u} = 0,000164 * (1 + 0,00383 * t) \tag{19}$$

$$\rho_{A1} = 0,000147 * (1 + 0,00341 * t) \tag{20}$$

$$c_{c_u} = 384 * (1 + 0,000279 * t) \tag{21}$$

$$c_{A1} = 886 * (1 + 0,000354 * t) \tag{22}$$

Теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать вывод о температурной независимости второго слагаемого уравнения теплового баланса провода. Поэтому оно записывается в виде  $K * F * \Theta / (C * m)$ , где K и C – средние значения коэффициента теплоотдачи и удельной теплоемкости проводов. С точностью до 0,5% третье слагаемое можно представить в виде  $[1 + (\alpha + \beta) * t]$ . После вычислений по-

лучим, что для проводов марок МФ  $-(\alpha + \beta) = 0,0034^\circ\text{C}^{-1}$  и  $A - (\alpha + \beta) = 0,0028^\circ\text{C}^{-1}$ . Таким образом, с целью упрощения расчетов уравнение теплового баланса можно представить в виде

$$\Theta(\tau) + [K * F / (c * m)] * \Theta - [(1 + ((\alpha + \beta) * t) / (c * m))] * I^2 * R_0 = 0. \quad (23)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\Theta = N * [1 - \exp(-M * \tau)] / M + \Theta_0 * \exp(-M * \tau) \quad (24)$$

$$M = (K * F - I^2 * R_0 * (\alpha + \beta)) / (c * m);$$

$$N = I^2 * R_0 * (1 + (\alpha + \beta) * t_0) / (c * m) \quad (25)$$

В этом уравнении все параметры определены с достаточной для практики точностью за исключением коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи определялся с помощью опытного стенда для тепловых испытаний проводов контактной сети. Он вычислялся по экспериментальным данным и подстановкою значений удельной теплоемкости в уравнение (25). Полученные зависимости  $K = f(v)$ , имеющие вид степенной функции с показателем степени 0,45-0,8, для диапазону скоростей ветра 1-10 м/с с погрешностью не более 2-3% можно аппроксимировать линейной функцией вида  $K = D + E * v$ . Параметры этой функции были получены методом наименьших квадратов, тогда  $K_{c_0} = 26,6 + 9,2v$  и  $K_{A_1} = 10,7 + 8,1v$ .

После исследований были проведены расчеты по определению перегрева исследуемых проводов для климатических условий, соответствующих экспериментальным. Отличие теоретических и экспериментальных данных не превышает  $3-4^\circ\text{C}$  при  $0 < \Theta < 150^\circ\text{C}$ : при нагреве проводов большими токами теоретическая кривая проходит на  $2-3^\circ\text{C}$  ниже

экспериментальной, создавая определенный запас, а при малых токах теоретическая кривая проходит на  $1-2^\circ\text{C}$  выше экспериментальной, что в конечном итоге не влияет на защиту от перегрева, т.к. при этом температура провода еще не достигает своего предельно допустимого значения.

#### 4. Выводы

Полученная математическая модель теплового состояния КП, учитывающая температурные зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплоотдачи материала КП, после исследования ее параметров позволяет более точно проанализировать тепловые процессы в КС и представляет практический интерес. Тем более, что в последнее время в вычислительной технике продолжается значительный прогресс в плане повышения быстродействия вычислительных средств и одновременном уменьшении их физических параметров, поэтому в новых разработках предпочтение отдается сложным, но более точным алгоритмам функционирования устройств температурного контроля, а не более простым в реализации, но менее точным. То есть устройство температурного контроля КП, основанное на решении уравнения теплового баланса, является перспективным для создания эффективной тепловой защиты КП с целью дальнейшего использования в информационно-управляющей системе электротранспорта. С помощью математической модели теплового состояния КП анализируется работа устройств контроля и защиты в аварийных режимах, воспроизведение которых в реальных условиях не представляется возможным.

Для решения трансцендентного уравнения использовались программы с применением численных методов.

#### Литература

1. Толстиков, А.Н. Математическое обеспечение элементов информационно-управляющей системы электротранспорта [Текст] / А.Н.Толстиков, Н.Г. Толстиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – 10(45), №3. – с.38–40.