

УДК 001.891:65.011.56:621.332

Описана математична модель теплового стану контактної дроти. Показана перспективність пристрою контролю температури дроти, заснованого на вирішенні рівняння теплового балансу, в інформаційно-управляючій системі електротранспорту

Ключові слова: інформаційно-управляюча система, пристрій контролю, математична модель, температура, контактний дріт

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

Ключевые слова: информационно-управляющая система, устройство контроля, математическая модель, температура, контактный провод

The mathematical model of the thermal state of the contact wire have been described. 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, mathematical model, temperature, contact wire

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

А. Н. Толстик

Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
E-mail: tols-alex@yandex.ru

Н. Г. Толстик

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой
Кафедра информатики
Харьковский гуманитарно-технический институт
ул. Кандаурова, 2, г. Харьков
Контактный тел.: (057) 335-24-29

1. Введение

Устройства контроля являются составной 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), основанные на методах прямого и косвенного контроля температуры КП, не обеспечивают в полной мере надежной защиты КС, так как они не срабатывают при малых токах КЗ в КС, меньших токов нагрузки, а также приводят к неоправданным отключениям сети при неопасных для нее кратковременных бросках тока.

Особую важность указанная задача приобретает в настоящее время, когда четко обозначилась тенденция к росту максимальных тяговых нагрузок в связи с интенсификацией движения городского электротранспорта и прогрессирующим внедрением параллельной работы в тяговой сети.

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. Следует заметить, что тепловые параметры КС существенно отличаются от тепловых параметров машин, аппаратов и других устройств, поэтому существующие тепловые реле не могут быть применены для защиты КС. 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, физический смысл которого заключается в том, что подводимое к КП количество тепла Q , в данном случае определяемого в соответствии с законом Джоуля-Ленца значением и временем действия проходящего по КП электрического тока, равно сумме количества тепла Q_p , отдаваемого им в окружающую среду, и тепла Q_{mc} , идущего на изменение его теплосодержания. Тогда уравнение теплового баланса КП в интегральной форме имеет вид

$$Q = Q_p + Q_{mc} \quad (1)$$

Анализируя тепловые процессы, определяемые происходящими в КС электрическими процессами и метеорологическими условиями ее работы, можно выделить три режима нагрева КП:

1. Рабочий режим, когда ток нагрузки питающей линии не превышает допустимый или когда возможны кратковременные перегрузки, характеризующийся тепловым равновесием, при котором количество тепла Q , выделяющегося в проводнике, равно количеству тепла Q_p , отдаваемого в окружающую среду, т.е. в рабочем режиме $Q = Q_p$ и $Q_{mc} = 0$;

2. Режим больших токов КЗ. В этом случае ток во много раз больше рабочего тока, но протекает в течение небольшого промежутка времени до момента срабатывания защиты и отключения питания. Вследствие этого выделяющееся в проводнике тепло не успевает рассеяться в окружающую среду и вызывает резкое повышение температуры проводника, т.е. в этом режиме $Q = Q_{mc}$ и $Q_p = 0$. В режиме КЗ интенсивный нагрев проводника длится сравнительно непродолжительное время, поэтому предельная температура нагрева проводника для этого режима допускается значительно большая, чем для нормального режима;

3. Режим длительных перегрузок и малых токов КЗ, когда джоулево тепло расходуется на нагрев КП и теплообмен с окружающей средой, то есть $Q = Q_p + Q_{mc}$.

В процессе работы КС электротранспорта при неизменном агрегатном состоянии КП в условиях изменяющейся температуры происходит соответствующее изменение его теплосодержания:

$$Q_{mc} = c * m * (t - t_0) = c * m * \Delta t = c * m * \Theta, \quad (2)$$

где m , c - соответственно масса (кг) и теплоемкость (Дж/кг*°С) материала КП; t , t_0 , Θ - соответственно температура поверхности проводника, окружающей среды и диапазон изменения температуры провода, °С.

Полный тепловой поток в результате теплообмена путем конвекции и лучеиспускания согласно формуле Ньютона равен

$$q_k = K * F * \Theta, \quad (3)$$

где K - суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²*°С); F - площадь поверхности проводника, равная произведению его длины l на периметр сечения КП b , т.е. $l * b$, м²; Θ - разность температур окружающей среды и КП, С.

Т.к. допустимая температура КП равна 100°С и градиент температуры КП по его длине равен нулю, а теплообмен проводника с атмосферой посредством теплопроводности незначителен, то можно считать, что выделяющееся в КП тепло расходуется на нагрев проводника и теплообмен с окружающей средой посред-

ством конвекции. По закону Джоуля-Ленца количество тепла, выделившегося в КП при прохождении по нему тока I , равно

$$q = u * I * \tau = I^2 * r * \tau, \quad (4)$$

где U - напряжение на шинах тяговой подстанции, В; I - ток нагрузки КС сети, А; R - сопротивление КС. Ом; τ - время действия тока I , с.

За время $d\tau$ в проводнике выделяется энергия $I^2 * r * \tau$, которая расходуется на повышение его температуры $c * m * d\Theta$ и рассеивается в окружающую среду $K * F * \Theta * d\tau$.

Тогда уравнение теплового баланса в дифференциальной форме будет иметь вид:

$$I^2 * r * d\tau = c * m * d\Theta + K * F * \Theta * d\tau$$

или

$$d\Theta / d\tau + K * F * \Theta / (c * m) - I^2 * r / (c * m) = 0. \quad (5)$$

Полученное уравнение используется для анализа процесса нагрева КП. Значительное различие теоретических и экспериментальных данных объясняется тем, что R , c , K являются функциями температуры, т.е. не постоянными, а варьируемыми параметрами. Учитывая, что

$$R = \rho_0 * (1 + \alpha * \Theta) * l / S \quad (6)$$

$$C = C_0 * (1 + \beta * \Theta) \quad (7)$$

$$K = K_0 * (1 + \gamma * \Theta) \quad (8)$$

$$t = \Theta + t_0 \quad (9)$$

$$m = p * l * b \quad (10)$$

$$F = l * b \quad (11)$$

(ρ - плотность материала КП; α , β , γ - соответственные температурные коэффициенты удельного электрического сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплоотдачи материала КП), получим

$$d\Theta / d\tau + K_0 * [1 + \gamma * (\Theta + t_0)] * b * \Theta / [C_0 * (1 + \beta * (\Theta + t_0))] * p * S - I^2 * \rho_0 * [1 + \alpha * (\Theta + t_0)] / [C_0 * (1 + \beta * (\Theta + t_0))] * p * S^2 = 0. \quad (12)$$

Отметим, что в уравнении отсутствует переменная l -длина КП, т.е. тепловое состояние КП не зависит от его длины, поэтому при неизменности физических свойств проводника по всей его длине и равномерном распространении тепла по КП достаточно рассмотреть тепловые процессы для проводника единичной длины.

После преобразований получим

$$c_0 * [1 + \beta * (\Theta + t_0)] * p * S^2 * d\Theta + [K_0 * (1 + \gamma * (\Theta + t_0))] * b * S * \Theta - I^2 * \rho_0 * (1 + \alpha * (\Theta + t_0))] * d\tau = 0, \quad (13)$$

$$d\tau = [c_0 * p * S^2 * (1 + \beta * t_0) + c_0 * p * S^2 * b * \Theta] * d\Theta / [-K_0 * b * S * \gamma * \Theta^2 + (I^2 * \rho_0 * \alpha - K_0 * b * S * (1 + \gamma * t_0)) * \Theta + I^2 * \rho_0 * (1 + \alpha * t_0)]. \quad (14)$$

Введя новые переменные

$$A_1 = c_0 * p * S^2 * (1 + \beta * t_0) \quad (15)$$

$$A_2 = c_0 * p * S^2 * b \quad (16)$$

$$B_1 = -K_0 * b * S * \gamma \quad (17)$$

$$B_2 = I^2 * \rho_0 * \alpha - K_0 * b * S * (1 + \gamma * t_0) \quad (18)$$

$$B_3 = I^2 * \rho_0 * (1 + \alpha * t_0) \quad (19)$$

Получим

$$d\tau = (A_1 + A_2 * \Theta) * d\Theta / (B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3) \quad (20)$$

и

$$c_u + \tau = \int_0^\Theta (A_1 + A_2 * \Theta) * d\Theta / (B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3) \quad (21)$$

Решение данного интегрального уравнения имеет вид

$$c_u + \tau = A_1 * \ln [B_1 * \Theta^2 + B_2 * \Theta + B_3] / 2B_1 + (2B_1 * A_2 - A_1 * B_2) * \ln [(2B_1 * \Theta + B_2 - (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) / (2B_1 * \Theta + B_2 + (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2})] / (2B_1 * (B_2^2 - 4B_1 * B_3)^{1/2}) = f(\Theta) \quad (22)$$

Постоянная интегрирования определяется из начальных условий $\tau = 0, \Theta = \Theta_0$, откуда

$$c_u=f(\Theta)=A_1*\ln[B_1*\Theta^2+B_2*\Theta+B_3]/2B_1+(2B_1*A_2-A_1*B_2)*\ln[(2B_1*\Theta+B_2-(B_2^2-4B_1*B_3)^{1/2})/(2B_1*\Theta_0+B_2-(B_2^2-4B_1*B_3)^{1/2})]/(2B_1*(B_2^2-4B_1*B_3)^{1/2}) \quad (23)$$

Тогда
 $f(\Theta)=\tau+f(\Theta_0), \Theta=f^{-1}[\tau, f(\Theta_0)]. \quad (24)$

4. Выводы

Полученная математическая модель теплового состояния КП, учитывающая температурные зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплоотдачи материала КП, 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.

Описано структурна, механічна та конструктивна схеми пристрою контролю температури та захисту контактної дроту. Показана перспективність подальшої розробки вказаного пристрою для створення ефективного теплового захисту

Ключові слова: інформаційно-управляюча система, пристрій контролю, температура, контактний дріт, відпал

Описаны структурная, механическая и конструктивная схемы устройства контроля температуры и защиты контактного провода. Показана перспективность дальнейшей разработки указанного устройства для создания эффективной тепловой защиты

Ключевые слова: информационно-управляющая система, устройство контроля, температура, контактный провод, отжиг

The structural, mechanical and constructive schemes of control temperature and defence of contact wire device have been described. Perspective of further development of the indicated device was shown for creation of effective thermal defence

Keywords: informative-managing system, device of control, temperature, contact wire, overheating

УДК 001.891:65.011.56:621.316.925

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

А.Н. Толстик

Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
E-mail: tols-alex@yandex.ru

Н.Г. Толстик

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой
Кафедра информатики
Харьковский гуманитарно-технический институт
ул. Кандаурова, 2, г. Харьков
Контактный тел.: (057) 335-24-29

1. Введение

Устройства контроля являются неотъемлемой частью информационно-управляющей системы электротранспорта, поэтому создание средств тем-

пературного контроля и защиты контактного провода (КП) от перегрева, имеет большое практическое значение. Т.к. анализ статистических данных о случаях неисправной работы электрооборудования в эксплуатации показывает, что в настоящее время