

УДК 621.3.011.1

*Д.С. Тарасов***РАЗРАБОТКА РУДНИЧНЫХ ИСКРБЕЗОПАСНЫХ СИСТЕМ ИЗ БЕЗОПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Семинар № 21

**О**беспечение отраслей топливно-энергетического комплекса качественно новым взрывозащищенным и рудничным электрооборудованием с более высокими технико-экономическими характеристиками, позволяющими повысить энерговооруженность, производительность труда, технический уровень и экономию ресурсов в этих отраслях является актуальной задачей.

В последние десятилетия в связи с переходом на более глубокие горизонты и освоение новых месторождений нередко со сложными горно-геологическими условиями, увеличилась частота и интенсивность выделения природных газов в угольных шахтах и рудниках. Если раньше источником выделений в основном были угольные шахты, то в настоящее время к традиционной проблеме обеспечения безопасности при разработке газоносных угольных и соляных месторождений в горном деле добавилась дополнительная проблема – борьба с выделениями природных газов и паров жидкостей при разработке рудных месторождений. Состав выделяющихся в горные выработки газов и паров жидкостей зависит от природных условий газоносности месторождений и может включать в себя как углеводородные, так и не углеводородные горючие компоненты. Соотношение между отдельными горючими компонентами изменяется в широком диапазоне концентраций от тысячных долей

процента до десятков процентов по объему. В большой степени меняется также суммарное содержание составляющих в объеме природных газовыделений. В атмосфере горных выработок могут образоваться горючие смеси, относящиеся по взрывоопасности к категориям I, IА, IВ и IС.

Традиционно для горной промышленности создавалось рудничное электрооборудование только для I категории взрывоопасности применительно к метановоздушной смеси. Задача разработки и изготовления рудничного электрооборудования для других категорий взрывоопасности находится в стадии постановки.

Искробезопасные электрические цепи присутствуют практически во всех типах существующего и вновь разрабатываемого рудничного взрывозащищенного электрооборудования. Искробезопасная электрическая цепь является основным видом взрывозащиты [1] рудничных систем управления, контроля, сигнализации, связи, автоматики и телемеханики. Данный вид взрывозащиты позволяет безопасно эксплуатировать электрооборудование во взрывоопасной атмосфере, что является существенным преимуществом в сравнении с другими видами взрывозащиты. Однако область применения данного вида взрывозащиты ограничена маломощными электрическими системами. Расширение области применения этого прогрессивного

вида взрывозащиты позволит существенно снизить стоимость оборудования, его габариты и вес, а также повысить общий уровень безопасности ведения работ на горных предприятиях.

Одним из путей решения этой научно-технической задачи является разработка новых принципов конструирования и проведения сертификационных испытаний искробезопасной аппаратуры. Суть нового метода состоит в использовании «безопасных» элементов при конструировании искробезопасной аппаратуры, таких как источники питания, линия связи и реактивные нагрузки. Реализация данного подхода состоит в установлении исходных данных для оценки искробезопасности основных наиболее распространенных на практике источников питания. Исходными данными для оценки искробезопасности источников питания будут установленные взаимосвязи между их параметрами на границе воспламенения взрывоопасной смеси.

В части линии связи необходимо установить ее параметры, при которых они не увеличивают воспламеняющую способность электрических разрядов при подключении ее к источнику питания, условия испытаний на искробезопасность при сертификации электрических систем с кабельными линиями связи и область их рационального применения. В результате выполненных исследований необходимо установить взаимосвязи между параметрами электрических цепей, содержащих линию связи с воспламеняющей способностью электрических разрядов и технические требования к линиям связи, при выполнении которых последние являются «безопасными» элементами.

Физическая суть понятия «безопасный» элемент состоит в том, что при подключении к источнику питания ин-

дуктивного элемента, содержащего индуктивность и омическое сопротивление, индуктивность увеличивает воспламеняющую способность электрических разрядов, а омическое сопротивление – снижает. «Безопасный» элемент будем иметь тогда, когда влияние индуктивности и омического сопротивления взаимно компенсируют друг друга и воспламеняющая способность электрических разрядов останется на том же уровне, что и в режиме короткого замыкания источника питания. Одновременно при этом имеем условие, при котором из источника питания в нагрузку может передаваться энергия с максимальной мощностью.

В случае индуктивной нагрузки без искрогасящих шунтов и железных сердечников определение «безопасного» элемента полностью одно и то же как и для линии связи. Определенные сложности имеют место в случае индуктивных нагрузок с железными сердечниками в виду отсутствия методов их точного определения и значительных величин индуктивностей. В этом случае необходимо определить степень их шунтирования, при котором подключение такой нагрузки не изменит воспламеняющую способность электрических разрядов.

Предполагаемые методы исследований – аналитический (расчетный) метод оценки искробезопасности электрических цепей источников питания и установления взаимосвязей между их параметрами, обеспечивающими их искробезопасность. Достоверность установленных взаимосвязей будет подтверждена с помощью экспериментов во взрывной камере. Аналогичные методы исследований предполагается использовать и при установлении безопасных параметров линии связи и реактивных нагрузок.

Решение данной научно-технической задачи позволит упростить методы

обеспечения искробезопасности рудничных электрических систем, сделать их общедоступными для разработчиков рудничной аппаратуры, даст возможность осуществлять выбор рациональных параметров электрических цепей,

сократить до минимума продолжительность испытаний их на искробезопасность во взрывных камерах, повысить их мощность и надежность функционирования.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51330.10-99. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь i. Введ. от 01.01.00. –М.: Изд-во стандартов, 2000. - 117 с.

#### Коротко об авторах

Тарасов Дмитрий Сергеевич - аспирант ИПКОН РАН.



---

© Р.Г. Идиятуллин, А.Р. Бакиров,  
2006

УДК 629.076: 656.34: 656.132.6

*Р.Г. Идиятуллин, А.Р. Бакиров*

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СИЛОВОГО  
ПРИВОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО КРИТЕРИЮ  
МИНИМУМА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ**

Семинар № 21

Электрический транспорт является одним из основных потребителей электроэнергии, которая большей частью расходуется силовым приводом (СП) подвижного состава (ПС). Поэтому снижение удельного расхода электроэнергии (УРЭ) силовым приводом, а

также других транспортных издержек при выполнении назначенного объема перевозок является наиболее важной экономической задачей транспортной отрасли в рамках реализации Федеральной целевой программы «Энергосбережение России».

Одним из основных направлений снижения удельного расхода электрической энергии ПС городского электрического транспорта (ГЭТ) является разработка и внедрение оптимальных технологических режимов СП по критерию минимального расхода электроэнергии [1-2].

Методы поиска оптимальных технологических режимов силового привода ПС имеют свои достоинства, недостатки и свою целесообразную область использования. Полная классификация данных методов приведена в [1].

Целевая функция имеет вид:

$$C_{nn} = c_1 \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n [(F_k(v, \xi_i) + \alpha B_T(v, \xi_i)) \times v(\xi_i) + \beta] \Delta t_i \approx \approx c_1 \sum_{i=1}^n [(F_k(v, \xi_i) + \alpha B_T(v, \xi_i)) v(\xi_i) + \beta] \Delta t_i, \quad (1)$$

где  $\lambda = \max_{1 \leq i \leq n} \{\Delta t_i\}$  для

$\forall i \in [1, n]: \xi_i \in [t_{i-1}, t_i]$ ;  $c_1$  – стоимость 1 кВт·ч электрической энергии, затраченной на тягу поезда;  $B_T(v, t)$  – тормозная сила ПС;  $\alpha = c_5 k_T / c_1$ ,  $\beta = c_4 / c_1$  – безразмерные коэффициенты;  $n$  – число участков дискретизации отрезка  $[0, T_x]$ ,  $\Delta t_i$  – длина  $i$ -го участка дискретизации.

Задача поиска оптимального управления формулируется следующим образом: управление ПС должно выбираться таким, чтобы обеспечивался минимум целевой функции при перемещении поезда из начального пункта в конечный, выполнялись краевые условия задачи и ограничения, накладываемые на его переменные состояния, которые в некоторых случаях можно снять с помощью введения штрафных функций.

Выбор расчетной схемы поезда для математического моделирования прежде всего связан с выбором критериев достоверности модели и с проблемой оптимальной степени ее детализации. Однако, усложнения модели, позволяющие получить более точные результаты расчетов, не всегда являются целесообразными.

Примем обычные допущения, используемые в динамике подвижного состава, т.е. будем считать кузов, тележки, колесные пары и якоря тяговых двигателей твердыми телами. Расчетная схема системы двух единиц представлена на рис. 1.

Применяя алгоритм уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} = Q_k, \quad (2)$$

$$k \in [1, n],$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы двух единиц;  $\Pi$  – потенциальная энергия системы двух единиц;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $n$  – число степеней свободы механической системы;  $Q_k$  –  $k$ -я «обобщенная» сила;  $\phi_k$ ,  $q_k$  –  $k$ -я «обобщенная» скорость и «обобщенная» координата механической системы; – можно получить систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамическое поведение системы тяговых единиц (ТЕ) [1].

Математическая модель механической системы двух единиц достаточно сложна для проведения оптимизационных расчетов, поэтому ее необходимо упростить, например, с использованием метода разделения движений системы на «быстрые» и «медленные» составляющие [1].

В задаче построения математической модели тягового электродвигателя (ТЭД) существует два крайних подхода: на базе теории поля и теории электрических це-

Удалено: <sp>

Удалено: <sp>



---

**Рис. 2. Моделируемый ТЭД**

Одной из трудностей численного анализа является разнесение собственных частот системы, когда с малым шагом интегрирования приходится прорисовывать высокочастотные составляющие на больших временных интервалах. При исследовании задачи на больших характерных временах в уравнениях движения появляются малые параметры «слева», т. е. уравнения приобретают сингулярно возмущенную форму:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = Y(y, z, t, \mu); & y(0) = y_0, \\ \mu \frac{dz}{dt} = Z(y, z, t, \mu); & z(0) = z_0, \quad \mu \ll 1 \end{cases} \quad (4)$$

где  $y$  и  $z$  соответственно  $n$ - и  $m$ -мерные векторы.

Теорема академика А.Н. Тихонова позволяет исследовать сложные динамические системы, у которых быстрые составляющие движения имеют затухающий характер, а воздействия на систему, зависящие явно от времени, - медленные. Это позволяет составлять приближенные уравнения, которыми описываются быстрые и медленные составляющие движения по отдельности. Дан-

ные уравнения можно считать на ЭВМ - каждое в своем масштабе времени.

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты [1-2]:

1. Для современных условий эксплуатации трамваев: высокого износа путевого хозяйства и контактной сети, наличия подвижного состава, выработавшего заданный ресурс, действия многочисленных ограничений по скорости движения и др., - построена концепция оптимального управления технологическими режимами силового привода трамваев.

2. Предложена методика математического упрощения «жесткой» системы нелинейных дифференциальных уравнений поезда, опирающаяся на теорему А.Н. Тихонова и позволяющая строго отделять «медленные» составляющие решения от «быстрых» и оценивать допускаемые при этом погрешности счета. В результате такой обработки уравнений каждая из подсистем может интегрироваться со своим шагом, что существенно снижает затраты машинного времени на выполнение оптимизационных расчетов. Кроме того, «вырождение» уравнений

по «быстрым» переменным в несколько раз уменьшает ее порядок.

3. Разработаны алгоритм и методика оптимизации технологических режимов силового привода подвижного состава трамваев с учетом ограничений безопасности движения, минимизирующие функционал как функцию скоростей на элементах продольного профиля пути. Использование методики оптимизации технологических режимов силового привода подвижного состава трамваев на специализированных вычислительных машинах дает возможность построить тренажеры для водителей, работающие в режиме реального времени.

4. В результате аналитического исследования и анализа существующих методов расчета технологических режимов силового привода трамваев установлено, что их использование приводит к недопустимому расхождению между расчетными и эксплуатационными значениями параметров режимов работы СП. Экспериментальным путем получены формулы для расчета УРЭ ТЭД на перегонах при реализации оптимальных технологических режимов силового привода трамваев. Результаты многочисленных эксперимен-

тальных исследований подтвердили адекватность предложенной математической модели расчета УРЭ на тягу трамваев реальным условиям эксплуатации. Расхождение расчетных и экспериментальных значений УРЭ не превышает 10 %.

5. Предложены алгоритм и методика расчета режимных карт (РК), с учетом полученных зависимостей для оценки параметров оптимальных технологических режимов силового привода трамваев. Методика расчета РК реализована на ЭВМ. Разработана методика экспериментальных исследований технологических режимов СП на трамвайных маршрутах с использованием РК и бортовой системы учета параметров режима. Методика позволяет оценить энергетические и скоростные характеристики режимов движения трамваев, а также разработать нормы расхода электроэнергии на тягу ПС. Внедрение режимных карт, рассчитанных по предложенной методике расчета оптимальных технологических режимов силового привода, позволило получить до 3 % экономии электрической энергии, расходуемой на тягу трамваев. Глубина экономии от реализации оптимальных технологических режимов СП составляет 12 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакиров А.Р.* Снижение электропотребления силового привода электрического транспорта: Научное издание. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005. – 256 с.
2. *Бакиров А.Р.* Разработка методики

расчета рациональных эксплуатационных режимов тяговых электродвигателей трамваев. Дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 - Казань: КГЭУ, 2003. – 161 с.

#### Коротко об авторах

*Идиятуллин Ринат Гайсович* – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой ЭСО,  
*Бакиров Альберт Робертович* – доцент кафедры ЭСО, кандидат технических наук,  
Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).





