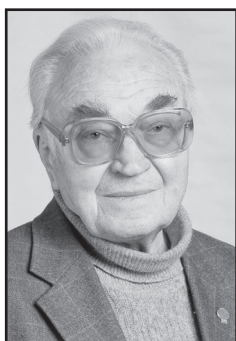




Преобразовательно-распределительное устройство для тяговых подстанций



Владимир ПУПЫНИН
Vladimir N. PUPYININ

Иван КАЛУГИН
Ivan G. KALUGIN



Пупынин Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Калугин Иван Геннадьевич — аспирант кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» МИИТ, Москва, Россия.

Предложена перспективная схема преобразовательно-распределительного устройства 3,3 кВ для тяговых подстанций постоянного тока, обладающая существенными технико-экономическими преимуществами. Схема выполнена с использованием управляемого 12-пульсового выпрямителя, построенного без катодных групп вентилей во вторых мостах выпрямителей. Трехфазные выключатели фидеров собраны на тиристорах, у которых катоды электрически соединены между собой и образуют выводы постоянного тока. Приведено описание основных элементов устройства, а также рассмотрен алгоритм его работы. С помощью программы MATLAB создана математическая модель тяговой подстанции и выполнено моделирование отключения короткого замыкания на одном из фидеров контактной сети. При этом на другом фидере учитывалась тяговая нагрузка. Для наглядности результаты моделирования приведены в виде осциллограммы, на которой весь процесс отключения разделен на несколько этапов.

Ключевые слова: железная дорога, системы тягового электроснабжения, тяговые подстанции, бесконтактные выключатели, тиристоры, математическая модель, преобразовательно-распределительное устройство.

Известно, что передачу энергии движущимся электрическим поездам от тяговых подстанций (ТП) системы тягового электроснабжения (СТЭ) обеспечивает тяговая сеть, образуемая контактной сетью и рельсами путей. В силу особенностей «скользящего» токосъема количество аварийных повреждений (коротких замыканий на 1 км развернутой длины сети) на один-два порядка больше, чем на промышленных сетях переменного тока 6÷35 кВ [1]. Ограничение и быстроедействующее прерывание аварийных токов при коротких замыканиях (КЗ) в контактной сети обеспечивается ныне быстродействующими электромагнитными дуговыми выключателями постоянного тока. При отключении этих выключателей между размыкаемыми контактами загорается мощная электрическая дуга, которая загоняется в специальную дугогасительную камеру [1]. Поэтому электромагнитные выключатели имеют относительно малый рабочий ресурс и требуют квалифицированного обслуживания.

Интенсивное развитие силовой полупроводниковой техники [2, 3] позволяет в настоящее время применять мощные

бездуговые отключающие устройства в комплекте с преобразователями (выпрямительными агрегатами) тяговых подстанций. Поскольку при эксплуатации подобных устройств отключение токов производится «статически», то есть без наличия размыкаемых контактов и образования открытой электрической дуги, рабочий ресурс таких электротехнических конструкций многократно превосходит ресурс дуговых электромагнитных выключателей. Один из вариантов схожей модели [4], получивший название преобразовательно-распределительного устройства 3,3 кВ (ПРУ-3,3 кВ), нами как раз далее и рассматривается.

Предлагаемая схема ПРУ-3,3 кВ для ТП постоянного тока показана на рис. 1. Управляемые выпрямители 1 (на рисунке присутствует один) выполнены по 12-пульсовой усеченной схеме, т. е. без катодной группы вентилей второго моста выпрямителя, получают питание от преобразовательных трансформаторов. Фазные шины второго моста отделены разъединителями 2 от расщепленной трехфазной «плюс»-шины 3, к которой через разъединители 4, 9 подключаются управляемые трехфазные фидерные выключатели 5 и запасной выключатель 10, выполняющие одновременно функции катодной группы второго моста выпрямителя. В случае нахождения выключателей 5, 10 в выкатном варианте роль разъединителей 4, 9 будут выполнять розеточные контакты. Катоды вентилей выключателей 5 соединены между собой электрически и образуют плюсовые выводы фидеров постоянного тока 15. Катоды вентилей запасного выключателя 10 также соединены между собой и образуют вывод 16, который через разъединитель 13 позволяет подключать выключатель 10 к обходной шине 14.

К плюсовым выводам всех фидеров и запасного выключателя присоединены катоды вентилей 7 диодных разрядных устройств (ДРУ) 6, 11, а их поглощающие резисторы 8 подключены к «минус»-шине 17 выпрямителя подстанции, с которой также связан реактор сглаживающего устройства 18. К рельсовому (отсасывающему) фидеру 19 за реактором 18 могут быть подключены индивидуальные фильтры сглаживающих устройств (на схеме не показаны).

ПРУ-3,3 кВ работает следующим образом. При нормальном режиме управляемые выпрямители 1, разъединители 2, все выключатели фидеров контактной сети 5, диодные разрядные устройства 6, 11 и линейный разъединитель запасного выключателя 13 включены, а разъединитель 9 запасного выключателя 10 и его управляемые вентили, как и обходные разъединители 12, отключены.

Отключение токов нагрузки или КЗ любого фидера имеют свои особенности. Вручную, по команде диспетчера, или по сигналу релейной защиты поврежденного фидера снимаются управляющие импульсы со всех вентилей преобразовательного агрегата и непосредственно фидера контактной сети, в результате чего за время, не превышающее 0,02 секунды после снятия управляющих импульсов, поврежденный фидер оказывается отключенным. При этом на незначительное время (менее 0,1 с) остальные фидеры остаются обесточенными.

Существенно, что энергия, запасенная в индуктивности тяговой сети поврежденного фидера и сглаживающем реакторе ТП 18, рассеивается в активном сопротивлении тяговой сети и разрядном сопротивлении диодного устройства 8 поврежденного фидера. После того как все вентили закроются, вновь подаются отпирающие импульсы, но только на вентили преобразовательных агрегатов ТП. Таким образом, в режиме быстрого действия автоматического повторного выключения (БАПВ) восстанавливается электроснабжение по неповрежденным фидерам контактной сети. При этом неповрежденные фидеры испытывают лишь кратковременную перегрузку, что не сказывается на работе электроподвижного состава (ЭПС).

Заметное преимущество преобразовательно-распределительного устройства 3,3 кВ по сравнению с существующими типовыми решениями заключается в следующем. Как в свое время было показано [1, 4], пережоги проводов контактной сети при дуговых КЗ происходят в большей мере не за счет энергии, притекающей к поврежденному месту от ТП, а в основном (на 60–90%) предопределяются энергией, притекающей к месту КЗ от ЭПС, находящегося на путях, питаемых от рассматри-



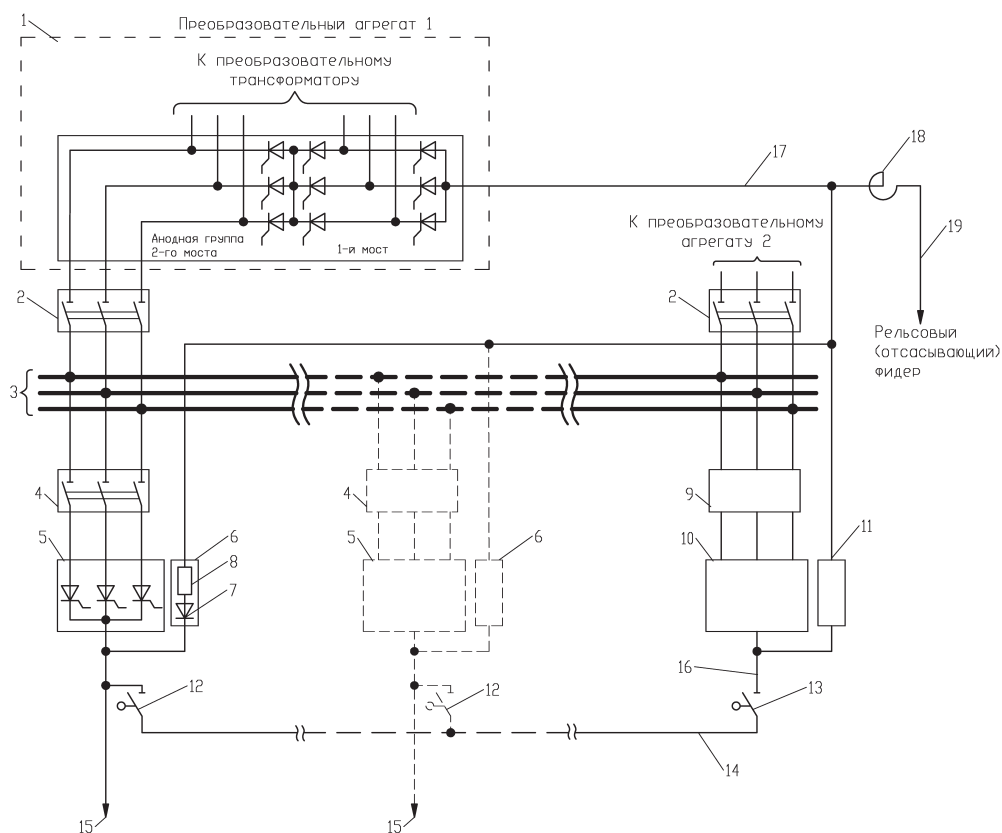


Рис. 1. Принципиальная схема ПРУ-3,3 кВ для тяговых подстанций постоянного тока.
 1 – Управляемый выпрямитель, выполненный по 12-пульсовой усеченной схеме без катодной группы вентилей второго моста выпрямителя; 2, 4, 9 – трехполюсный разъединитель; 3 – расщепленная трехфазная «плюс»-шина; 5 – управляемый трехфазный фидерный выключатель; 10 – управляемый трехфазный запасной выключатель; 6, 11 – диодное разрядное устройство; 7 – вентиль диодного разрядного устройства; 8 – поглощающий резистор диодного разрядного устройства; 12, 13 – обходной разъединитель фидера контактной сети; 14 – обходная шина; 15 – плюсовой вывод фидера постоянного тока; 16 – плюсовой вывод запасного фидера постоянного тока; 17 – «минус»-шина; 18 – реактор сглаживающего устройства; 19 – рельсовый (отсасывающий) фидер.

ваемой ТП. Последняя формируется медленнозатухающей противо-ЭДС тяговых двигателей, которая при резком снижении напряжения в тяговой сети из-за КЗ в течение достаточно длительного времени становится большей, чем напряжение, подводимое к ЭПС. В предлагаемом же преобразовательно-распределительном устройстве тиристоры на трехфазных выключателях фидеров тяговой сети отсекают приток энергии со стороны ЭПС, находящихся на неповрежденных фидерах. Это обстоятельство позволяет сократить количество пережогов проводов контактной сети.

При повреждении тиристорного выключателя 5 любого фидера благодаря наличию обходных разъединителей и обход-

ной шины 14 он может быть заменён запасным выключателем 10.

Дополнительно путем изменения угла сдвига управляющих импульсов одновременно на всех вентилях преобразователей и фидерных выключателей можно регулировать величину выпрямленного напряжения тяговой подстанции.

Анализ рассмотренной схемы и исследование ее работы в различных режимах выполнены на основе компьютерного моделирования, являющегося одним из самых эффективных методов изучения сложных электротехнических систем. С помощью приложения SimPowerSystems, входящего в состав пакета прикладных программ MATLAB [5] и предназначенного для моделирования электротехнических

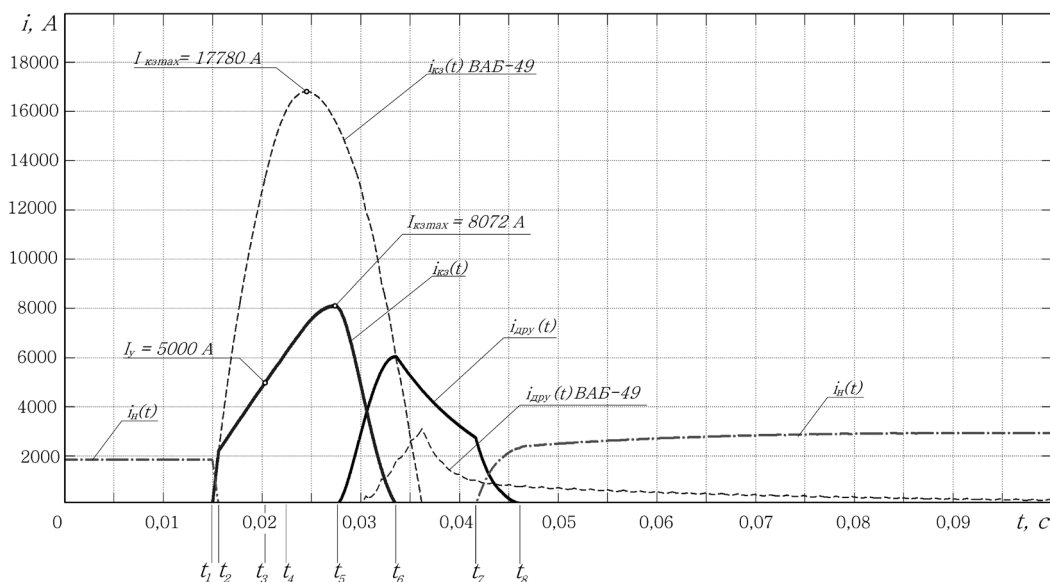


Рис. 2. Осциллограмма токов, поясняющая процесс отключения тока короткого замыкания.
 $i_n(t)$ – тяговая нагрузка неповрежденного фидера тяговой подстанции; $i_{кз}(t)$ – ток короткого замыкания поврежденного фидера тяговой подстанции; $i_{кз}(t)$ ВАБ-49 – ток короткого замыкания поврежденного фидера при отключении выключателем типа ВАБ-49; $i_{дру}(t)$ – ток через диодное разрядное устройство; $i_{дру}(t)$ ВАБ-49 – ток через диодное разрядное устройство выключателя типа ВАБ-49; I_y – значение уставки защиты; $I_{кзmax}$ – максимальное ограниченное значение тока короткого замыкания;
 t_1 – момент возникновения короткого замыкания;
 t_2 – момент спада к нулю тока неповрежденного фидера;
 t_3 – момент достижения уставки защиты;
 t_4 – начало отключения тока короткого замыкания;
 t_5 – момент открытия диодного разрядного устройства;
 t_6 – момент отключения выключателем тока короткого замыкания;
 t_7 – момент восстановления питания нагрузки неповрежденного фидера;
 t_8 – момент закрытия диодного разрядного устройства.

устройств, построена математическая модель тяговой подстанции постоянного тока с предложенным преобразовательно-распределительным устройством 3,3 кВ.

В ходе моделирования было принято, что ТП имеет схему с одноступенчатой трансформацией при первичном питающем напряжении $U_c = 110$ кВ. Мощность трехфазного короткого замыкания на вводах ТП составляла $S_{ск}^{(3)} = 2000$ МВА. Полная мощность трансформаторов преобразовательных агрегатов принималась равной $S_{пт} = 20$ МВА. Напряжение короткого замыкания коммутации бралось по каталожным данным: $u_{к\%} = 14\%$. Приведение параметров питающей сети и тяговой подстанции к вентильным обмоткам преобразовательных трансформаторов производилось по методике, изложенной в [6].

В качестве примера на рис 2 приведены некоторые результаты моделирования работы ТП с ПРУ-3,3 кВ, а именно процесса отключения КЗ в контактной сети на од-

ном из фидеров ТП. При этом на другом фидере моделировалась тяговая нагрузка. Она формировалась под действием разности напряжения в контактной сети и противо-ЭДС коллекторных двигателей ЭПС, медленно затухающей с постоянной времени $\tau_{дв} = 0,2$ с.

Для сравнения было выполнено моделирование отключения тока КЗ в цепи с аналогичными параметрами широко распространенным в тяговых сетях электромагнитным выключателем типа ВАБ-49, установленным на ТП с типовой схемой РУ-3,3кВ. Осциллограммы токов через выключатель ВАБ-49 с подключенным диодным разрядным устройством (ДРУ) показаны пунктирными линиями на рис. 2 и выполнены в одном масштабе с током отключения бесконтактным выключателем.

Поясним результаты моделирования, демонстрируемые на рис. 2. Как видно, до момента t_1 тяговая нагрузка $i_n(t)$ на од-





ном фидере оставалась неизменной, а на другом фидере равнялась нулю. В момент времени t_1 на фидере без нагрузки происходит глухое КЗ, ток фидера $i_{кз}(t)$ нарастает, вытесняя ток нагрузки $i_n(t)$. При КЗ напряжение в тяговой сети резко снижается, и подвижной состав продолжает движение по инерции. Против-ЭДС его двигателей, направленная встречно току нагрузки $i_n(t)$, сводит его к нулю в момент t_2 . Наличие тиристорных выключателей фидеров контактной сети 5 препятствует подпитке места КЗ от подвижного состава на соседнем фидере.

Далее в момент t_3 , ток КЗ достигает значения уставки защиты типа ЦЗАФ-3,3 [7], равной 5000 А. Спустя 0,002 секунды в момент t_4 защита формирует команду на закрытие управляемых клапанов преобразовательного агрегата и поврежденного фидера контактной сети. Наступает процесс отключения тока $i_{кз}(t)$ путем естественной коммутации тиристоров при падении тока через них до нуля. После перехода через максимальное значение ток $i_{кз}(t)$ начинает уменьшаться и в момент t_5 , когда падение напряжения на индуктивности тяговой сети и реактора станет равным и противоположным по знаку падению напряжения на активных сопротивлениях этих элементов, открывается ДРУ 6, через которое протекает ток $i_{дру}(t)$. При этом шунтируется индуктивность тяговой сети и сглаживающего реактора 18, что приводит к уменьшению времени отключения выключателем, который к моменту t_6 полностью прерывает ток $i_{кз}(t)$.

Оставшаяся энергия, накопленная в тяговой сети и сглаживающем реакторе, рассеивается в активном сопротивлении указанных элементов и поглощающем сопротивлении ДРУ. В момент t_7 защита подает отпирающие импульсы на клапаны преобразовательного агрегата, тем самым восстанавливая электроснабжение неповрежденного фидера. Ток в этом фидере $i_n(t)$ начинает нарастать, снижая ток $i_{дру}(t)$, который становится равным нулю в момент времени t_7 . Бросок тока на нагрузку $i_n(t)$ объясняется затуханием против-ЭДС двигателей в процессе отключения поврежденного фидера из-за возникшей бестоковой паузы на неповрежденном фидере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По сравнению с традиционными схемами преобразования переменного тока в постоянный и схемами распределительных устройств 3,3 кВ тяговых подстанций предложенный вариант ПРУ позволит снизить массогабаритные показатели преобразователей и выключателей фидеров тяговой сети. Результат достигается благодаря использованию для этих целей компактных полупроводников (тириستоров) и применению оригинальной усеченной 12-пульсовой схемы выпрямления с последовательным соединением мостов, без катодной группы клапанов во вторых мостах выпрямителей, роль которых выполняют тиристоры выключателей.

Существенно повысится ресурс фидерных выключателей постоянного тока с учетом того, что отключение коротких замыканий в предложенной схеме осуществляется бездуговым способом с естественной коммутацией тиристоров в момент спада тока через них до нуля. Значительная энергия, накопленная в тяговой сети, рассеивается в диодном разрядном устройстве. Уровень перенапряжений при отключении цепи бесконтактными выключателями оказывается заметно ниже, чем при отключении дуговыми электромагнитными выключателями.

Немаловажно, что тиристоры в цепях каждого трехфазного фидерного выключателя исключают возможность подпитки места КЗ от соседних ТП и ЭПС, находящихся в фидерной зоне питаемого участка железной дороги, и тем самым отсекают от места КЗ основную (60–90%) часть энергии, пережигающей провода контактной сети.

Благодаря отсутствию подвижных элементов в ПРУ-3,3 кВ отключение с его помощью аварийных КЗ происходит гораздо быстрее, чем дуговыми электромагнитными выключателями, и поэтому, как следствие, оказывает меньшее воздействие на контактную сеть при дуговых КЗ в ней.

Перечисленные преимущества рассмотренной схемы преобразовательно-распределительного устройства позволяют сделать вывод о перспективности ее внедрения на тяговых подстанциях системы электрической тяги постоянного тока 3,3 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. Тяговые подстанции: Учебник для вузов. — М.: Транспорт, 1986. — 319 с.
2. Современная отечественная элементная база для силовой преобразовательной техники / В. Мартыненко и др. // Силовая электроника. — 2005. — № 3. — С. 120–123.
3. Ohashi H. High voltage high current semiconductor devices and its new application-future power electronics possibilities for social infrastructure // Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on 23–27 Oct. 2011. p 408–411.
4. Патент № 124991 на полезную модель (РФ), МПК: B60M H02J. Тяговая подстанция системы

электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (12–24 кВ) / Калугин И. Г., Пупынин В. Н. Заявлено 25.05.2012. Оpubл. 20.02.2013. Бюл. № 3.

5. Sybille G. Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset // Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. p 2973–2981.

6. Урманов Р. Н. Теория преобразователей при конечных сопротивлениях схем. — Екатеринбург: УрГУПС, 2003. — 154 с.

7. Гречишников В. А., Пупынин В. Н. Выбор уставок защиты, реализуемой интеллектуальным терминалом ЦЗАФ-3,3: Учеб. пособие. — М.: МИИТ, 2012. — 60 с. ●

CONVERSION AND DISTRIBUTION UNIT FOR TRACTION POWER SUPPLY SUBSTATIONS

Pupynin, Vladimir N. – D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Kalugin, Ivan G. – Ph.D. student at the department of power supply of electric railways of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Intense development of power semiconductor units allows designing powerful arcless disconnection devices which could make a single set along with conversion units of traction substations. The authors suggest a promising design of conversion and distribution 3,3 kV unit for DC power traction substations, that has some technical and economic advantages. The circuit is realized with the help of controlled 12 pulse rectifier, built without cathode groups of cells in the second bridges of rectifiers. Three-phase switches of feeders are assembled on thyristors, and the cathodes there-of are electrically

interconnected and create the terminals of direct current. The main elements of the unit are described and the algorithm of its operation is studied. Using the MATLAB software, the authors have created mathematical model of traction substation and simulated disconnection of a short-circuit at one of the feeders of overhead catenary, while considering a traction load at the other feeder. To make better demonstration of the model, the results of simulation are shown as an oscilloscope pattern, where the process of disconnection is divided into several stages.

Key words: railway, systems of traction power supply, traction substation, contactless switches, thyristors, mathematical model, conversion and distribution unit.

REFERENCES

1. Bey Yu.M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. Traction Substations. Textbook for higher schools [*Tyagovye podstantsii: Uchebnik dlia vuzov*]. Moscow, Transport publ., 1986, 319 p.
2. Modern national circuitry for power conversion technics [*Sovremennaya otechestvennaya elementnaya baza dlia silovoy preobrazovatel'noy tekhniki*]. Martynenko et al. *Silovaya elektronika*, 2005, № 3, pp. 120–123.
3. Ohashi H. High voltage high current semiconductor devices and its new application-future power electronics possibilities for social infrastructure. Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on 23–27 Oct. 2011. Pp. 408–411.
4. Patent № 124991 for utility model (Russian Federation), MPK: B60M H02J. Traction substation of

the system of DC power supply of high voltage (12–24 кВ). Kalugin I. G., Pupynin V. N. Deposited 25.05.2012. Published 20.02.2013. Bulletin № 3.

5. Sybille G. Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. Pp. 2973–2981.

6. Uрманов R. N. Theory of converters with finite resistance circuits [*Teoriya preobrazovateley pri konechnykh soprotivleniyah schem*]. Yekaterinburg, UrGUPS, 2003. 154 p.

7. Grechishnikov V. A., Pupynin V. N. Selection of settings of protection, realized by intellectual terminal TSAF-3,3. Tutorial [*Vybor ustavok zaschity, realizuemoi intellektualnym terminalom TSAF-3,3*]. Moscow, MIIT (Moscow State University of Railway Engineering), 2012, 60 p.

Координаты авторов (contact information): Пупынин В. Н. (Pupynin V. N.) – pupynin_v@mail.ru; Калугин И. Г. (Kalugin I. G.) – sakh_wanderer@mail.ru, kaluginig@rzd.ru

Статья поступила в редакцию / article received 22.04.2013
Принята к публикации / article accepted 15.05.2013

