

Выбор решений для модернизации цепей управления двигателями метровагонов



Павел ВЕСЕЛОВ

Pavel A. VESELOV

The Choice of Solutions for Modernization of Control Circuits of Metro Cars' Engines
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 188)

Среди приоритетных проблем для метрополитена – повышение энергоэффективности, достигаемое в том числе за счет применения рекуперативного торможения. Статья посвящена проекту, разработанному в Национальном исследовательском университете «МЭИ» и предполагающему использование в схеме управления двигателями метровагонов IGBT-транзисторов. Демонстрируемый вариант призван помочь достижению целого ряда преимуществ, а унифицированность предложенного применительно к серийным вагонам 81–717/14 решения позволяет дать «новую жизнь» вагонам, которые не выработали свой ресурс, но чьи технические возможности морально устарели на фоне нового поколения поездов и современных требований к их эксплуатации.

Ключевые слова: метрополитен, рекуперация, IGBT, цепи управления двигателя, энергетическая эффективность, модернизация поездов.

Веселов Павел Александрович – аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.

Инвентарный парк московского метрополитена на 1 января 2013 года состоял преимущественно (на 66%) из вагонов серии 81-717/14 и их модификаций [1]. Данный вид имеет реостатно-контакторную систему управления тяговыми машинами (ТМ) и не предусматривает возможности рекуперативного торможения (РкТ), что на фоне новых поколений вагонов как отечественного, так и импортного производства оптимизма не вызывает. Несомненно, обновление подвижного состава (ПС) отстает от потребностей «подземки» и, в частности, от темпов роста новых линий [2].

В этих условиях и с учетом актуальности проблем энергоэффективности метрополитена и применения РкТ получили дополнительный импульс идеи модернизации используемых вагонов. При разработке новых силовых схем и цепей управления двигателями особое значение отводилось РкТ, чему способствовал опыт успешной эксплуатации накопителей электроэнергии (НЭ) на тяговой подстанции (ТП) Т-23 Филевской линии московского метрополитена, показавший, что установка НЭ позволила частично сгладить график энергопотребления, снизить просадку напряжения на шинах ТП

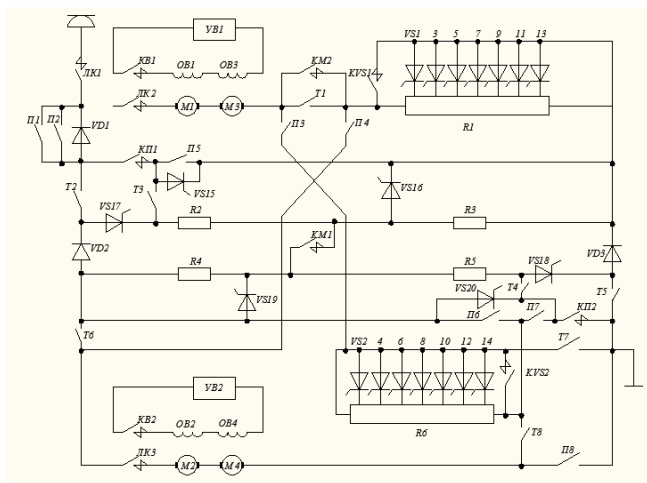


Рис. 1. Схема силовых цепей вагона метрополитена с тиристорно-реостатным контроллером (ТРК), разработанным в МЭИ.

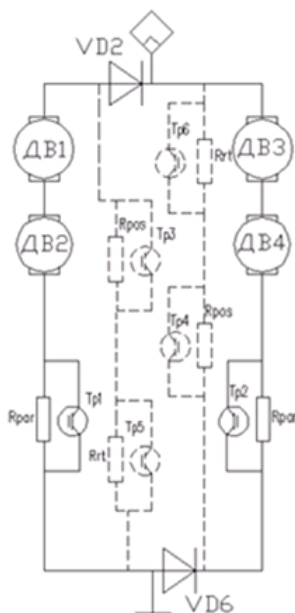


Рис. 2. Принципиальная схема силовых цепей вагона метрополитена с управлением пуско-тормозным сопротивлением IGBT при рекуперативном торможении и последовательным соединением тяговых машин.

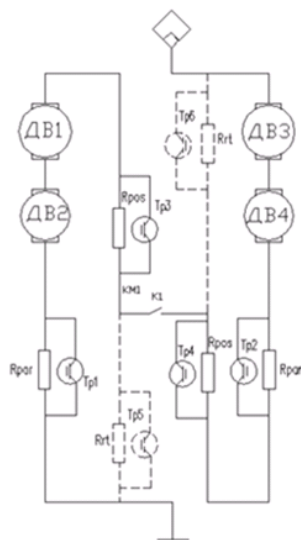


Рис. 3. Принципиальная схема силовых цепей вагона метрополитена с управлением пуско-тормозным сопротивлением IGBT при рекуперативном торможении и параллельным соединением тяговых машин.

и повысить энергетическую надежность тягового электроснабжения, сократив к тому же потребляемую на тяговой подстанции мощность на 13,4% [3].

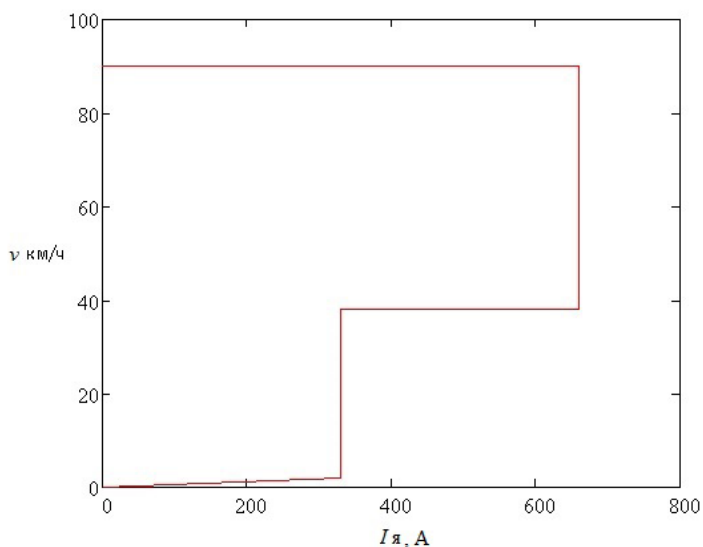
Учитывая возможности новой элементной базы, а также не получившей распространения, но позитивно показавшей себя на испытаниях [4] схемы с ТРК (рис. 1) для вагонов метрополитена 82-717/14 в МЭИ было принято решение развивать проект с заменой ТРК на IGBT транзисторы (рис. 2, 3) [5].

Недостатки полевых транзисторов представляли производителей силовых полу-

проводников искать компромиссное решение, позволяющее объединить достоинства транзисторов MOSFET и биполярных транзисторов Дарлингтона. В конце 80-х годов прошлого века было создано первое поколение биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors), а в начале 1990-х – второе и третье поколения. Эти приборы объединили в себе свойства MOSFET и биполярных транзисторов (малая мощность управления, высокая скорость коммутации, прямоугольная область безопасной работы, способность действо-



Рис. 4. Электромеханическая характеристика тока вагона $I_a=f(v)$ при торможении.



вать параллельно без выравнивающих элементов, малое падение напряжения в открытом состоянии, высокое предельное напряжение), что сделало IGBT практически идеальным силовым ключом [6].

Электромеханические расчеты пуско-тормозных характеристик проекта вагона с новой схемой управления на IGBT продемонстрировали многообещающие показатели. За счет высокой частоты переключения ключа транзистора характеристики получаются плавные (фактически прямые), что позволяет говорить о повышении общей плавности хода, а также эффективности тормозного процесса при плавном регулировании тормозной силы (рис. 4), в том числе и в зоне высоких скоростей движения, тем самым увеличивая комфортабельность для пассажиров и упрощая управление составом для машиниста.

Нелишне отметить, что на момент написания статьи по всему миру различные варианты применения рекуперативного торможения, в том числе с использованием емкостных накопителей, аккумуляторных батарей или кинетических накопителей энергии [7], были многократно испытаны, а в некоторых странах обрели неоспоримый приоритет [8]. Ярким примером являются подстанции рекуперации электроэнергии HESOP, чьи целевые экологические показатели в Европе включают сокращение энергопотребления подвижного состава на 15% [9]. Все это говорит о перспективности вагонов метрополитена, предус-

матривающих возможность РКТ, а саму рекуперацию делает одним из обязательных критериев повышения энергоэффективности транспорта.

Для максимальной эффективности схем управления на IGBT при модернизации вагонов особую важность приобретает подбор силовых элементов.

Учитывая перегруппировку двигателей, значения тока и напряжения в цепи, по каталогу на официальном интернет-сайте компании Semikron [10] нами был выбран модуль SKM600GA176D. Он выполнен в корпусе SEMITRANS-4 и по технологии Trench IGBT 3-го поколения, обеспечивающей сверхнизкие статические потери [11]. При этом надо заметить, что выбор именно таких транзисторов не исключает в дальнейшем возможность импортозамещения с заменой IGBT-модулей производства компании SEMIKRON на отечественные аналоги [12].

Для обоснования корректности выбора транзистора сделан термический расчет. Методика расчета мощности рассеяния импульсных силовых компонентов сводится к нахождению суммы статических и динамических потерь. Температура кристалла должна определяться с помощью графика теплового сопротивления. Исходными данными являются значение мощности потерь за импульс проводимости и температура корпуса элемента. Потери в полупроводниковых приборах имеют динамические и статические составляющие:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}}$$

В цепи IGBT-модуля протекает ток $I_{\text{max}} = 330 \text{ А}$.

Используя справочные данные, для IGBT-модулей типа SEMIKRON-SKM 600GA176D по графику потерь энергии на включение/выключение ($E_{\text{он}}/E_{\text{офф}} = f(I_c)$) при токе 330 А имеем:

$E_{\text{он}} = 210 \text{ мДж}$ – потери энергии при включении;

$E_{\text{офф}} = 130 \text{ мДж}$ – потери энергии при выключении.

Так как в справочном материале потери на включение/выключение приведены для одного срабатывания, а частота работы IGBT-модуля 800 Гц, то:

$$P_{\text{дин}} = (E_{\text{он}} + E_{\text{офф}}) \cdot f_p = 272 \text{ Вт}$$

Падение напряжения, по справочным данным, на модуле при температуре 125°C составляет $V_{\text{CE}}(\text{SAT}) = 2,1 \text{ В}$ – следовательно, статические потери мощности равны:

$$P_{\text{стат}} = I_{\text{max}} \cdot V_{\text{CE}}(0) \cdot k_{\text{зап}} = 153 \text{ Вт}$$

Общие потери для транзистора:

$$P_{\text{общие}} = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}} = 425 \text{ Вт}$$

Тепловое сопротивление IGBT-модуля на пути «кристалл–корпус»:

$R_{\text{th}}(j-c) = 0,044 + 0,02^\circ \text{С/Вт}$ (кристалл и радиатор).

Тогда перепад температуры между кристаллом и корпусом будет:

$$\Delta t_{j-c} = P_{\text{общ}} \cdot R_{\text{th}}(j-c) + T_c = 43,7^\circ \text{С}, \text{ где } T_c = 25^\circ \text{С} = 298 \text{ К}$$

Температура кристалла меньше допустимой, поскольку попадает в допустимый интервал, что дает право говорить о правильности выбора транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Унифицированность предложенного решения с серийными вагонами 81-717/14 позволяет дать «новую жизнь» вагонам, которые не выработали свой эксплуатационный ресурс, но чьи технические возможности морально устарели на фоне нового поколения поездов и современных требований к эксплуатации подвижного состава. Вариант модернизированной схемы перспективен для цепей управления в целях повышения энергоэффективности метрополитена, ибо РкТ становится в нынешних

условиях универсальным критерием снижения потребления электроэнергии для транспортных систем в целом. То есть он ценен еще и в стратегическом плане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Служба подвижного состава московского метрополитена. Типы вагонов. – Официальный интернет сайт московского метрополитена [Электронный ресурс] <http://mosmetro.ru/about/structure/rollingstock/coach/>. Доступ 28.07.2015.
2. Более двух тысяч новых вагонов закупит метрополитен Москвы – Официальный интернет-сайт мэра и правительства Москвы [Электронный ресурс] <http://depr.mos.ru/presscenter/news/detail/1054092.html>. Доступ 28.07.2015.
3. Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Эксплуатация накопителя электроэнергии на метрополитене // Мир транспорта. – 2013 – № 5. – С. 54–58.
4. Тулулов В. Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // Электросила. Вып. 41. – СПб., 2002. – С. 196–210.
5. Веселов П. А., Тулулов В. Д. Оценка возможностей улучшения эксплуатационных показателей метрополитенов // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 52–55.
6. Хермвиль М., Колпаков А. Управление изолированным затвором IGBT. Основные положения // Новости электроники. 2008, № 11. [Электронный ресурс] <http://www.compel.ru/lib/ne/2008/11/6-upravlenie-izolirovannyim-zatvorom-igbt-osnovnyie-polozeniya-chast-1>. Доступ 28.07.2015.
7. Ortega J. M., Ibaiondo H., Romo A. Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid, Challenge A: A more and more energy efficient railway, 9th World Congress on railway research, May 22–26, 2011 [Электронный ресурс] http://www.vialibre-ffe.com/pdf/romo_asier.pdf. Доступ 28.07.2015.
8. González-Gil A., Palacin R., Batty P., Powell J. P. Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy // Transport Research Arena 2014, г. Париж, Франция, 2014 г. [Электронный ресурс] http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Paper_19902.pdf. Доступ 28.07.2015.
9. Хардер Ян. Партнерство транспортных компаний и университетов – ключ к инновационному развитию // Мир транспорта. – 2015. – № 1. – С. 226–242.
10. SKM 600GA176D, IGBT Modules SEMITRANS4. – Официальный интернет-сайт компании Semikron [Электронный ресурс] <http://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/skm600ga176d-22890432.html>. Доступ 28.07.2015.
11. Колпаков А. TRENCH-4 – первая универсальная технология IGBT // Вестник электроники. – 2014. – № 2. – С. 32–37.
12. Новиков П. В. Аналоги импортных транзисторных модулей «Электрум АВ». Часть 1. – Официальный интернет-сайт компании ЗАО «Электрум АВ», г. Орел [Электронный ресурс] <http://electrum-av.com/images/stati/analogi%20importnix%20moduley%20chast1.pdf>. Доступ 28.07.2015.

Координаты автора: **Веселов П. А.** – veselov.tpem@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 20.07.2015, актуализирована 28.07.2015, 23.10.2015, принята к публикации 27.10.2015.



THE CHOICE OF SOLUTIONS FOR MODERNIZATION OF CONTROL CIRCUITS OF METRO CARS' ENGINES

Veselov, Pavel A., National Research University «MPEI», Moscow, Russia.

ABSTRACT

The urgency of the problem of energy efficiency of metro resulted in multiple studies on the possibility to use regenerative braking in the metro.

The article analyzes new project developed at the Department of Electrical Transport of National Research University «MPEI» that suggests the use of IGBT transistors in engine control scheme of

metro cars. This option should contribute to the achievement of a number of advantages, and commonality of the proposed technical solutions in relation to serial cars 81-717/14 allows to give «new life» to cars which have not exhausted their service life, but which technical capabilities are obsolete as compared to a new generation of trains and modern technical requirements for their operation.

Keywords: metro, regeneration, recuperation, IGBT, engine control circuits, energy efficiency, modernization of trains

Background. On January 1, 2013 inventory rolling stock of Moscow metro consisted mainly (66%) of cars series 81-717/14 and their modifications [1]. This type of cars has a rheostat-contactor control system of traction machines (TM), and does not allow regenerative braking (RB), which against the background of the new generation of cars, both domestic and foreign, does not cause optimism. Undoubtedly, modernization of rolling stock (RS) in Moscow metro lags behind the needs of «underground», and in particular, the growth of new lines [2].

In this situation and given the urgency of the problem of power efficiency of metro and RB application the ideas of modernization of the operated cars received additional impulse. When developing new power schemes and engine control circuits RB was of special importance, especially due to successful trial operation of electric energy storage devices (ESD) in the traction substation (TS) TS-23 of Filevskaya line of Moscow metro, which showed that the installation of ESD allowed partially to smooth energy consumption graph, reduce voltage slump on bus bars of TS and increase energy reliability of traction power supply, reducing power consumed at TS by 13,4% [3].

Objective. The objective of the author is to consider possible technical solutions for modernization of control circuits of metro car's engines with the help of IGBT.

Methods. The author uses general scientific and engineering methods, techniques of electrical engineering, comparative analysis, modeling, graph construction.

Results. Given the possibilities opened with the expansion of new element base, as well as the success of tests of previously developed [4] scheme with TRC (Pic. 1) for metro cars 82-717/14, though it has not been implemented, the researchers at NRU MPEI decided to develop the project with replacement of TRC with IGBT transistors. (Pic. 2, 3) [5].

Disadvantages of field-effect transistors forced manufacturers of power semiconductors to seek a compromise solution to combine the advantages of field-effect transistors MOSFET and bipolar transistors of Darlington. At the end of the 80s of the last century the first generation of insulated-gate bipolar transistor (IGBT) was created, and in the early 1990 s – the second and third generations. These devices have combined properties of MOSFET and bipolar transistors (low control power, high switching speed, rectangular area of safe operation, ability to work in parallel without leveling elements, small voltage drop in

the open state, high limit voltage) that made IGBT almost ideal power key [6].

Electrical calculations of start-braking characteristics of the project of the car with a new control circuit with IGBT showed excellent performance. Due to high switching frequency of the transistor key features are even (actually straight lines), which allows us to talk about improvement of the overall smoothness, as well as of the efficiency of the braking process by modulating the brake force (Pic. 4), including in the area of high-speed traffic, thereby increasing passenger comfort and simplifying train driving for a driver.

It should also be noted that at the time of writing this article a variety of options for the use of regenerative braking, including using capacitive storage, batteries or kinetic energy storage [7], have been repeatedly tested and, in some countries have gained an undisputable priority [8]. A striking example can be seen at substations of electric energy regeneration HESOP, which environmental targets in Europe include reducing energy consumption of rolling stock by 15% [9]. All of this allows us to speak about the prospect of metro cars providing for the possibility of RB and to regard RB itself as one of the most important criteria to improve energy efficiency of transport.

To maximize the effectiveness of control circuits with IGBT, namely during modernization of cars, the particular importance should be paid to the selection of power elements.

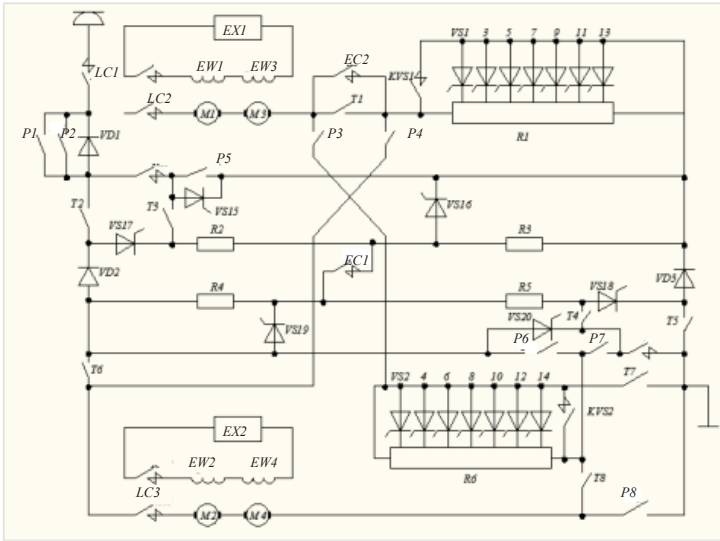
Given regrouping of engines, values of voltage and current in the circuit, according to the catalog on the official web site of the company Semikron [10] we have selected module SKM600GA176D. This module is configured in the housing SEMITRANS-4 and with technology Trench IGBT 3rd generation, providing ultra low static losses [11]. It is important to note that the selection of these transistors does not exclude opportunity of replacement of IGBT modules manufactured by SEMIKRON by domestic analogs [12].

To substantiate the correctness of the choice of the transistor thermal calculation was conducted. Methods of calculating power dissipation of pulse power components is reduced to finding the sum of static and dynamic losses. The temperature of the crystal must be determined using the graph of thermal resistance. The initial data are the values of power loss per pulse of conductivity and temperature of the body of the element. Losses in semiconductor devices have two components: dynamic and static:

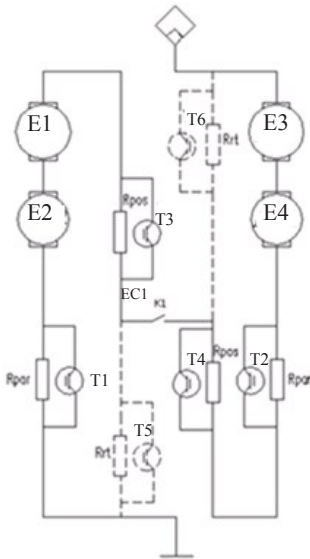
$$P_{\text{tot}} = P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}}$$

In circuit of IGBT module current flows $I_{\text{max}} = 330 \text{ [A]}$.

Using reference data for IGBT modules type SEMIKRON-SKM 600GA176D, according to the graph



Pic. 1. Schematic diagram of power circuits of metro cars with thyristor-rheostat controller (TRC), developed at the Department of ET in MPEI: EX – exciters; P – transverse disconnectors with electric drive; LC – line contactors; EC – electromagnetic contactors; EW – excitation winding; T – automatic switches; KVS – contactors; VS – thyristors; M – DC commutator motor; R – rheostats; VD – block diodes.



Pic. 2. Schematic diagram of power circuits of metro car with control of start-braking resistance with IGBT at regenerative braking and series connection of traction machines:

E1-E4 – engines; T1-T6 – transistors; Rpar – rheostats (resistors), involved in the parallel connection of traction machines; Rrt – rheostats (resistors), involved in regenerative braking; Rpos – Rheostats (resistors), involved a series connection of traction machines; EC – electromagnetic contactor.

of energy losses in the power on / off ($E_{on}/E_{off} = f(I_c)$) for the current 330 [A] we have:

$E_{on} = 210$ [mJ] – energy losses at turning on;

$E_{off} = 130$ [mJ] – energy losses at turning off.

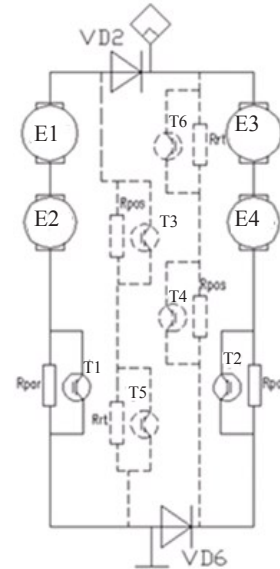
Since in the reference material losses on/off are given for one actuation and operation frequency of IGBT module is 800 Hz then:

$$P_{din} = (E_{on} + E_{off}) \cdot fp = 272 \text{ [W]}$$

The voltage drop, according to reference data, on module at a temperature of 125 °C is $V_{CE(SAT)} = 2,1$ [V], hence static power losses are equal:

$$P_{stat} = I_{max} \cdot V_{CE(0)} \cdot k_{charg} = 153 \text{ [W]}$$

Total losses for transistor are:



Pic. 3. Schematic diagram of power circuits of metro car with control of start-braking resistance with IGBT at regenerative braking and parallel connection of traction machines:

E1-E4 – engines; T1-T6 – transistors; VD – block diode; Rpar – rheostats (resistors), involved in the parallel connection of traction machines; Rrt – rheostats (resistors), involved in regenerative braking; Rpos – Rheostats (resistors), involved a series connection of traction machines.

$$P_{tot} = P_{stat} + P_{din} = 425 \text{ [W]}$$

Thermal resistance of IGBT module in the way «crystal – case» is:

$$R_{th(j-c)} = 0,044 + 0,02 \text{ } ^\circ\text{C/W (crystal and radiator)}$$

Then, the temperature difference between the crystal and the case will be:

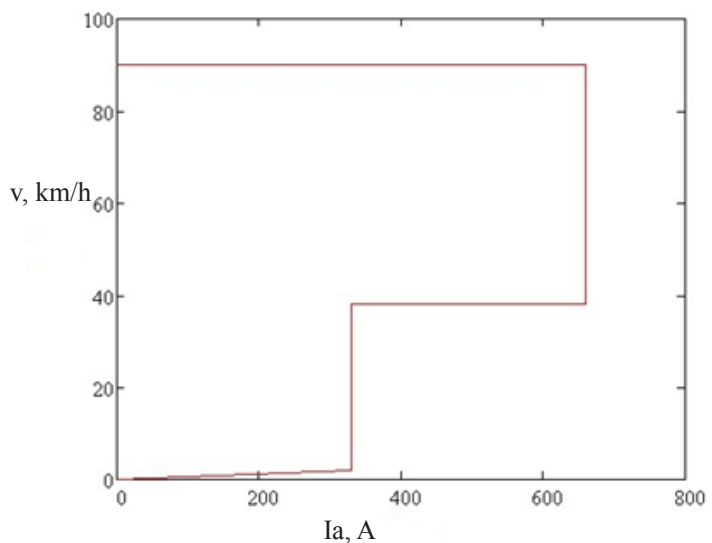
$$\Delta t_{j-c} = P_{tot} \cdot R_{th(j-c)} + T_c = 43.7 \text{ } ^\circ\text{C, where } T_c = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 298 \text{ K.}$$

The temperature of the crystal is less than acceptable, as it falls in the allowable range, that allows us to talk about the correct choice of the transistor.

Conclusion. Commonality of the proposed technical solutions with serial cars 81–717/14 al-



Pic. 4. Electromechanical characteristics of the current of car $I_a = f(v)$ during braking.



allows us to give «new life» to cars which have not exhausted their service life, but which technical capabilities are obsolete against the backdrop of a new generation of trains and modern technical requirements and tasks of rolling stock operation. The option of modernized scheme is also promising for control circuits to improve energy efficiency of metro, because now RB is a universal criterion for reducing energy consumption of transport systems in general. Therefore, it is important from strategic perspective.

REFERENCES

1. Rolling stock service of Moscow Metro. Types of cars [Sluzhba podvizhnogo sostava moskovskogo metropolitena. Tipy vagonov]. The official web site of Moscow Metro [Electronic source] <http://mosmetro.ru/about/structure/rollingstock/coach/>. Last accessed 28.07.2015.
2. Moscow Metro will buy more than two thousand new cars [Moskovskij metropoliten zakupit bolee dvuh tysjach novyh vagonov]. The official web site of the Mayor and the Moscow government [Electronic source] http://www.mos.ru/press-center/themes/printable.php?print=1&openNews=29166&search_4=1684&view_mode_4=tag_search&view_module_4=mediagallery_file. Last accessed 28.07.2015.
3. Grechishnikov, V. A., Shevlugin, M. V. Operation of power storage device in Moscow Metro. *World of Transport and Transportation*, Vol. 11, 2013, Iss. 5, pp. 54–58.
4. Tulupov, V. D. Traction DC motor with the best technical and economic parameters [Tjagovyj elektroprivod postojannogo toka s nailuchshimi tehniko-ekonomicheskimi pokazateljami]. *Elektrosila*, Iss. 41, St. Petersburg, 2002, pp. 196–210.
5. Veselov, P. A., Tulupov, V. D. Assessing opportunities for improvement of operational indicators of subways [Ocenka vozmozhnostej uluchshenija ekspluatacionnyh pokazatelej metropolitenov]. *Elektrotehnika*, 2015, Iss. 5, pp. 52–55.
6. Hermvil, M., Kolpakov, A. Control of insulated gate of IGBT. Main provisions [Upravlenie izolirovannyim zatvorom IGBT. Osnovnye polozhenija]. *Novosti elektroniki*, 2008, Iss. 11. [Electronic source]; <http://www.compel.ru/lib/ne/2008/11/6-upravlenie-izolirovannyim-zatvorom-igbt-osnovnyie-polozheniya-chast-1>. Last accessed 28.07.2015.
7. Ortega J. M., Ibaiondo H., Romo A. Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid, Challenge A: A more and more energy efficient railway, 9th World Congress on railway research, May 22–26, 2011. [Electronic resource]: http://www.vialibre-ffe.com/pdf/romo_asier.pdf. Last accessed 28.07.2015.
8. Gonz lez-Gil A., Palacin R., Batty P., Powell J. P. Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy // Transport Research Arena 2014, Paris, France, 2014 [Electronic source]: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fpaper_19902.pdf. Last accessed 28.07.2015.
9. Harder, J. Transport Industrial-Academic Partnership as a Key Success Factor of Innovation. *World of Transport and Transportation*, 2015, Vol. 13, Iss. 1, pp. 226–242.
10. SKM600GA176D, IGBT Modules SEMITRANS4. The official web site of the company Semikron [Electronic source] <http://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/skm600ga176d-22890432.html>. Last accessed 28.07.2015.
11. Kolpakov, A. TRENCH 4 – the first versatile technology of IGBT [TRENCH-4 – pervaja universal'naja tehnologija IGBT]. *Vestnik elektroniki*, 2014, Iss. 2, pp. 32–37.
12. Novikov, P. V. Analogs to imported transistor modules «Electrum AB». Part 1 [Analogi importnyh tranzistornyh modulej «Elektrum AV». Chast' I]. The official web site of the company JSC «Electrum AB», Orel [Electronic source] <http://electrum-av.com/images/stati/analogi%20importnix%20modulej%20chast1.pdf>. Last accessed 28.07.2015. ●

Information about the author:

Veselov, Pavel A. – Ph.D. student at the department of Electrical transport of National Research University «MPEI», Moscow, Russia, veselov.tpem@gmail.com.

Article received 20.07.2015, revised 28.07.2015, 23.10.2015, accepted 27.10.2015.