DOI: 10.17117/ns.2015.01.072

<http://ucom.ru/doc/ns.2015.01.072.pdf>

Поступила (Received): 24.06.2015

**Беспалов Н.Н., Капитонов С.С.,
Ильин М.В., Григорович С.Ю.
Описание модели переходного процесса
выключения силового диода**

**Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Ilyin M.V., Grigorovich S.Yu.
Description of the model transient switching power diode**

Одной из наиболее распространённых причин выхода из строя силовых полупроводниковых приборов является возникновение на них коммутационных перенапряжений в момент выключения. При групповом соединении силовых полупроводниковых приборов ситуация усугубляется тем, что коммутационное перенапряжение распределяется неравномерно по приборам вентильного плеча. Для расчёта значений ёмкости защитных снабберных конденсаторов нужно отдельно определить величину ёмкости, обеспечивающую защиту силовых полупроводниковых приборов при воздействии на них каждого из вышеуказанных видов перенапряжения. Максимальное значение из ряда ёмкостей снабберных конденсаторов, полученных для различных видов перенапряжений, принимается значением, обеспечивающим защиту силовых полупроводниковых приборов от всех видов перенапряжений. Для того чтобы рассчитать значение ёмкости снабберных конденсаторов, обеспечивающих защиту силовых полупроводниковых приборов при воздействии на них перенапряжения определённого вида, нужно описать теоретическими зависимостями напряжение на приборах вентильного плеча. В статье проведён теоретический вывод формул, которые описывают переходный процесс выключения силового диода в зависимости от значений температуры его полупроводниковой структуры и параметров снабберных цепей

Ключевые слова: силовые диоды, устройства силовой электроники, коммутационные перенапряжения

One of the most common causes of failure of the power semiconductor devices is the formation of switching overvoltages on them at the time of shutdown. For group connection of power semiconductor devices the situation is aggravated by the fact that the switching surge is unevenly distributed on the shoulder of the valve devices. To calculate the values of the snubber capacitor capacitance protection need to separately determine the amount of capacity that ensures the protection of power semiconductor devices when exposed to each of the above types of surge. The maximum value of the number of containers snubber capacitors obtained for different types of surge takes the value that protects the power semiconductor devices of all types of surge. In order to calculate the value of the snubber capacitor capacitance protecting power semiconductor devices when exposed to a certain type of overvoltage, it is necessary to describe the theoretical dependence of the voltage on the shoulder of the valve devices. The article provides a theoretical derivation of the formulas that describe the transient power off diode depending on the temperatures of its semiconductor structure and parameters of snubber circuits

Key words: power diodes, power electronic devices, switching overvoltages

Беспалов Николай Николаевич

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Bespalov Nikolai Nikolaevich

Candidate of Engineering Sciences, Head of
Department
Mordovia state university named N.P. Ogarev
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Капитонов Сергей Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Kapitonov Sergei Sergeevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
Mordovia state university named N.P. Ogarev
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Ильин Михаил Владимирович

Кандидат технических наук, доцент
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Ilyin Mikhail Vladimirovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
Mordovia state university named N.P. Ogarev
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Григорович Сергей Юрьевич

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Grigorovich Sergei Yurievich

Mordovia state university named N.P. Ogarev
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда
(проект №15-19-20057).*

Введение (Introduction)

Одной из наиболее распространённых причин выхода из строя силовых полупроводниковых приборов (СПП) является возникновение на них коммутационных перенапряжений в момент выключения. При групповом соединении СПП ситуация усугубляется тем, что коммутационное перенапряжение распределяется неравномерно по приборам вентильного плеча [1–3]. В процессе эксплуатации устройств силовой электроники (УСЭ) на основе группового последовательного соединения СПП на приборах и на вентильном плече возникают следующие виды перенапряжений:

- 1) коммутационные перенапряжения на отдельных СПП группы при их выключении;
- 2) коммутационные перенапряжения на вентильном плече при его выключении;
- 3) перенапряжения, обусловленные неравномерным распределением напряжения вентильного плеча по СПП при их выключении;
- 4) перенапряжения, обусловленные неравномерным распределением напряжения вентильного плеча по СПП в состоянии низкой проводимости.

Для расчёта значений ёмкости защитных снабберных конденсаторов нужно отдельно определить величину ёмкости, обеспечивающую защиту СПП при воздействии на них каждого из вышеуказанных видов перенапряжения [4-5]. Максимальное значение из ряда ёмкостей снабберных конденсаторов, полученных для различных видов перенапряжений, принимается значением, обеспечивающим защиту СПП от всех видов перенапряжений. Для того чтобы рассчитать значение

ёмкости снабберных конденсаторов, обеспечивающих защиту СПП при воздействии на них перенапряжения определённого вида, нужно описать теоретическими зависимостями напряжение на приборах вентильного плеча [6–8]. Ниже приведён теоретический вывод формул, которые описывают переходный процесс выключения силового диода в зависимости от значений температуры его полупроводниковой структуры (ПС) и параметров снабберных цепей.

Материалы и методы (Materials and Methods)

В данном разделе рассмотрен случай, когда необходимо обеспечить ограничение коммутационных перенапряжений на отдельных приборах вентильного плеча. В основу исследования положен метод, представленный в [1]. На рис. 1 показана эквивалентная схема замещения СПП, в которой протекают процессы аналогичные процессам, возникающим при выключении приборов вентильного плеча [9–10].

Рис. 1. Эквивалентная схема замещения для исследования переходного процесса выключения СПП

На рис. 1 введены следующие обозначения: e – напряжение на СПП, равное значению напряжения питания, делённому на количество приборов в вентильном плече; R_n – сопротивление нагрузки; R и C – резистор и конденсатор снабберной цепи; L – сумма индуктивностей контура коммутации; $S1$ и $S2$ – идеальные ключи; ИТ – источник тока, реализующий функцию тока обратного восстановления СПП.

Режим, соответствующий переходному процессу выключения СПП, создаётся в схеме (рис. 1) путём осуществления следующих этапов:

1) протекание через СПП тока, ограниченного сопротивлением нагрузки, при этом ключ $S1$ замкнут, ключ $S2$ разомкнут;

2) при достижении током, протекающим через СПП, значения амплитуды тока обратного восстановления, ключ $S1$ размыкается, а $S2$ замыкается, и через СПП протекает спадающий по экспоненциальному закону ток обратного восстановления.

При выключении СПП коммутационное перенапряжение, возникающее на нём, может изменяться по колебательному или апериодическому закону.

Рассмотрим переходные процессы, возникающие в СПП при колебательном режиме изменения напряжения на нём. Все зависимости приведённые далее приведены в [1]. Для колебательного процесса выполняется неравенство:

$$\frac{R^2 C}{4L} < 1 \quad (1)$$

Закон изменения напряжения на СПП при этом описывается следующим выражением [1]:

$$u_R(t) = u_e + (A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t) \exp(-bt) + D_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (2)$$

где u_e – напряжение источника питания; A_1, B_1, D_1 – постоянные интегрирования, зависящие от амплитудного значения обратного тока I_{rr} , L, R, C ; b – корень характеристического уравнения, зависящий от L и R ; τ_i – постоянная времени, характеризующая скорость спада i_{rr} ; ω – круговая частота.

В выражении (4.4) коэффициенты A_1, B_1, D_1, b и ω определяются следующим образом:

$$A_1 = u_e \frac{b}{\omega} + I_{rr} \frac{R\tau_i + 2L - R^2 C}{2\omega(\tau_i^2 - RC\tau_i + LC)}; \quad (3)$$

$$B_1 = -u_e - I_{rr} \frac{L\tau_i + RLC}{\tau_i^2 - RC\tau_i + LC}; \quad (4)$$

$$D_1 = I_{rr} \frac{L\tau_i + RLC}{\tau_i^2 - RC\tau_i + LC}; \quad (5)$$

$$b = \frac{R}{2L}; \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - b^2}. \quad (7)$$

Скорость изменения напряжения на СПП при его выключении определяется для колебательного режим, как производная по времени от функции напряжения, описанной формулой (4.3):

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{du_e}{dt} + \exp(-bt) \left((A_1 \omega - B_1 b) \cos \omega t - (B_1 \omega + A_1 b) \sin \omega t \right) - \frac{D_1}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (8)$$

Если процесс, протекающий в СПП при его выключении, является аperiодическим, то, как показано в [1], справедливо неравенство:

$$\frac{R^2 C}{4L} > 1. \quad (9)$$

Закон изменения напряжения на СПП при аperiодическом процессе описывается следующей зависимостью:

$$u_R(t) = u_e + (A_2 \exp(\lambda t) + B_2 \exp(-\lambda t)) \exp(-bt) + D_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (10)$$

где A_2, B_2, D_2 – постоянные интегрирования, зависящие от I_{rr}, L, R, C ; λ – корень характеристического уравнения, зависящий от L, C и R .

Коэффициенты A_2, B_2, D_2 , и λ определяются по следующим формулам:

$$A_2 = u_e \left(\frac{R}{4\lambda L} + \frac{1}{2} \right) + I_{rr} \left(\frac{R\tau_i + 2L - R^2 C}{4\lambda(\tau_i^2 - RC\tau_i + LC)} - \frac{L\tau_i - RLC}{2(\tau_i^2 - RC\tau_i + LC)} \right); \quad (11)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}; \quad (12)$$

$$B_2 = -u_e \left(\frac{R}{4\lambda L} + \frac{1}{2} \right) - I_{rr} \left(\frac{R\tau_i + 2L - R^2 C}{4\lambda(\tau_i^2 - RC\tau_i + LC)} + \frac{L\tau_i - RLC}{2(\tau_i^2 - RC\tau_i + LC)} \right); \quad (13)$$

$$D_2 = I_{rr} \frac{L\tau_i - RLC}{\tau_i^2 - RL\tau_i + LC}. \quad (14)$$

Скорость изменения напряжения на СПП при его выключении для аperiодического режима равна производной от функции напряжения, выраженной формулой (10) [1]:

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{du_e}{dt} + A_2(-b + \lambda) \exp(-b + \lambda)t + B_2(-b - \lambda) \exp(-b - \lambda)t - \frac{D_2}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (15)$$

Для расчёта зависимости напряжения, возникающего на СПП при его выключении, и скорости его нарастания в соответствии с вышеописанными формулами (3–15), нужно рассчитать амплитудное значение тока обратного восстановления I_{rr} , которое определяется выражением [25]:

$$I_{rr} = \pi I_{T(F)m} f \tau_{p0} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}, \quad (16)$$

где $I_{T(F)m}$ – амплитудное значение тока, протекающего через СПП в СВП; f – частота напряжения питающей сети; T_j – температура ПС; T_{j0} – начальная температура ПС; τ_{p0} – времена жизни дырок в n -области при T_{j0} .

Результаты (Results)

Таким образом, с помощью математических зависимостей (1–15) описаны переходные процессы, протекающие в отдельных СПП вентильного плеча при их выключении. Температурная зависимость напряжения на СПП при его выключении учитывается путём расчёта амплитудного значения тока обратного восстановления $I_{гр}$, входящего в зависимости (3, 4, 11, 13) по формуле (16). Полученные зависимости (1–16) положены в основу методики расчёта значений ёмкости снабберных конденсаторов, обеспечивающих защиту СПП вентильного плеча от коммутационных перенапряжений [11–13].

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Методика, созданная на основе полученных зависимостей, предоставляет возможность комплексного определения значений снабберных цепей, обеспечивающих защиту от всех разновидностей перенапряжений, возникающих на СПП, в то время как существующие методы [14–15] являются узконаправленными и позволяют проводить расчёт только для перенапряжений определённого вида [16–17].

Представленные зависимости позволяют определять минимальные значения параметров снабберных цепей, поскольку при расчёте рассматривается режим работы вентильного плеча в УСЭ, наиболее близкий к реальному [18–20].

Список используемых источников:

1. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Определение минимальных величин ёмкостей снабберных цепей для ограничения коммутационных перенапряжений на силовых полупроводниковых приборах при их выключении // *Естественные и технические науки*. М.: Спутник+, 2011. Вып. № 6. С. 396–404.
2. Беспалов Н.Н., Евишев А.В., Ильин М.В., Капитонов С.С. Исследование процессов, протекающих в цепях с последовательным групповым соединением силовых полупроводниковых приборов при их выключении // *Огарев-online*. 2015. №11.
URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/issledovanie-processov-protekayushhix-v-cepyax-s-posledovatelnyim-grupповым-soedineniem-silovyx-poluprovodnikovyx-pribov-pri-ix-vyklyuchenii>
3. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов. Саранск : изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т. 1. С. 362–364.
4. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С., Пьянзин И.И. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // *Электроника и информационные технологии*. 2010. Вып. 2 (9). URL: <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/LowConductivity.pdf> – 04201000067/0036
5. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Матюшкин В.В. Генератор испытательных импульсов для диагностики силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // *Огарев-online*. 2014. № 3.
URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/generator-ispytatelnykh-impulsov-dlya-dagnostiki-silovykh-poluprovodnikovyx-pribov-v-sostoyanii-nizkoj-provodimosti>
6. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Смолин А.Н. Обзор устройств для измерения значений параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // *Огарев-online*. 2014. № 22.

URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/obzor-ustrojjstv-dlya-izmereniya-znachenijj-parametrov-i-kharakteristik-silovykh-poluprovodnikovyx-priborov-v-sostoyanii-nizkojj-provodimosti>

7. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лысенков А.Е. Испытательное оборудование на базе технологий компании NATIONAL INSTRUMENTS для определения вольт-амперной характеристики силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости // Компьютерные измерительные технологии. М.: ДМК пресс. Электронные книги, 2015. Т. 1. С. 97–100.
8. Беспалов Н.Н., Лысенков А.Е., Ильин М.В., Капитонов С.С. Аппаратно-программный комплекс для испытания силовых МДП-транзисторов // Компьютерные измерительные технологии.. М.: ДМК пресс. Электронные книги, 2015. Т. 1. С. 168–171.
9. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Описание модели силового диода в состоянии низкой проводимости // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты. Тамбов, 2015. С. 20–23.
10. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Equipment for testing and diagnostics of power semiconductor device. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
11. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Program for modeling transient off of power semiconductor devices. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
12. Bepalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. MOSFETs selection software to form parallel and series connections. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
13. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения. Саранск : изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 234–238.
14. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Исследование вариации величины заряда обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // Электроника и информационные технологии, 2011. Вып. 2 (11). URL: http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse_recovery_charge.pdf
15. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Испытательная аппаратура для определения электрических и тепловых параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов // Электроника и информационные технологии. 2012. Вып. 1 (12). URL: <http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Bepalov%20Ilyin%20Kapitonov.pdf>
16. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state // 11TH International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012. Novosibirsk: IEEE, 2012. №1. P. 143–147.
17. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2011. Вып. №6. С. 405–412.
18. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim // Электроника и электрооборудование транспорта. Томилино: Томилинский электронный завод, 2012. Вып. № 4. С. 30–35.
19. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // Нелинейный мир. М.: Радиотехника, 2011. Вып. 8. С. 500–506.
20. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Капитонова А.В. Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники // Научно-технический вестник Поволжья. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. Вып. № 1. С. 65–68.

References:

1. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Determination of the minimum capacitance values snubber circuits to limit switching surges on power semiconductor devices when they are turned off. Natural and Technical Sciences. M.: Sputnik +, 2011. Vol. № 6. P. 396–404.
2. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Evishev A.V. Investigation of the processes occurring in the circuit with a consistent group connection of power semiconductor devices when you turn off the. Ogarev-online. 2015. №11. URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/issledovanie-processov-protekayushhix-v-cepyax-s-posledovatelnyy-gruppovym-soedineniem-silovykh-poluprovodnikovyx-priborov-pri-ix-vyklyuchenii>
3. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Hardware-software complex for testing and diagnostics of power semiconductor devices. Saransk: publisher of Mordovia State University, 2014. Vol. 1. P. 362–364.

4. Bepalov N.N., Kapitonov S.S., Pyanzin I.I. Modeling of characteristics of power semiconductor devices in low conductivity state. *Electronics and Information Technology*. 2010. Vol. 2 (9).
URL: <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/LowConductivity.pdf> – 04201000067/0036
5. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Matyushkin V.V. Generator of test pulse for the diagnosis of power semiconductor devices in low conductivity state. *Ogarev-online*. 2014. № 3.
URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/generator-ispytatelnykh-impulsov-dlya-diagnostiki-silovykh-poluprovodnikov-ykh-priborov-v-sostoyanii-nizkoy-provodimosti>
6. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Smolin A.N. Overview of devices for measuring the values of the parameters and characteristics of power semiconductor devices in a state of low conductivity. *Ogarev-online*. 2014. № 22.
URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/obzor-ustroystv-dlya-izmereniya-znachenij-parametrov-i-kharakteristik-silovykh-poluprovodnikov-ykh-priborov-v-sostoyanii-nizkoy-provodimosti>
7. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Test equipment, based on technology of NATIONAL INSTRUMENTS company, to determine the current-voltage characteristics of power semiconductor devices in a state of high conductivity. *Computer Measurement Technology*. M.: DMK press. Electronic books, 2015. Vol. 1. P. 97–100.
8. Bepalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Hardware-software complex for testing power MOSFETs. *Computer Measurement Technology*. M.: DMK press. Electronic books, 2015. Vol. 1. P. 168–171.
9. Bepalov N. N., Ilyin M. V., Kapitonov S. S. Model description of the power diode in low conductivity state. *Questions of Education and Science: theoretical and methodical aspects*. Tambov, 2015. P. 20–23.
10. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Equipment for testing and diagnostics of power semiconductor device. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
11. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Program for modeling transient off of power semiconductor devices. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
12. Bepalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. MOSFETs selection software to form parallel and series connections. Omsk. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber>
13. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. The temperature dependence of the reverse recovery current of power semiconductor devices. Saransk: publisher of Mordovia State University, 2012. P. 234–238.
14. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. Study of variation values of reverse recovery charge of power semiconductor devices. *Electronics and Information Technology*, 2011. Vol. 2 (11).
URL: http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse_recovery_charge.pdf
15. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Test equipment to determine the electrical and thermal parameters and characteristics of power semiconductor devices. *Electronics and Information Technology*, 2012. Vol. 1 (12). URL: <http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Bepalov%20Ilyin%20Kapitonov.pdf> – 04201200067/0004
16. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state. Novosibirsk: IEEE, 2012. №1. P. 143–147.
17. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Development and research of models for electric power semiconductor devices typical basic designs. *Natural and Technical Sciences*. M.: Sputnik +, 2011. Vol. №6. P. 405–412.
18. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Modeling of processes in power semiconductor devices in the series connection of the group in the medium Multisim. *Electronics and electrical transport*. Tomilino: Tomilino Electronic Factory, 2012. Vol. № 4. P. 30–35.
19. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. Alignment voltage on sequentially distributed power semiconductor devices in a low conductivity. *Nonlinear world*. M.: Radio, 2011. Vol. 8. P. 500–506.
20. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Kapitonova A.V. Method of selection of power semiconductor devices for group sequential circuits of power electronics devices. *Scientific and Technical Gazette of Volga*. Kazan: Scientific and Technical Gazette of Volga, 2014. Vol. № 1. P. 65–68.