

ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ R-C-VD ЦЕПочки НА ПРИМЕРЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2015

М.В. Позднов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника»
А.В. Прядилов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: демпфирующая цепочка; импульсный преобразователь; полупроводниковый преобразователь; перенапряжение на транзисторе; коммутационные процессы.

Аннотация: В данной статье рассмотрены основы выбора элементов защитной R-C-VD цепочки на примере импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН).

Целью работы является мотивированный выбор параметров защитной цепочки, необходимых для ограничения коммутационных перенапряжений на безопасном уровне. Задачи работы заключаются в описании процессов формирования коммутационных перенапряжений с разбиением коммутационных процессов на периоды времени, выявление величин этих перенапряжений исходя из параметров схемы и формулировании рекомендаций по выбору параметров защитных R-C-VD цепочек. Объектом исследования является демпфирующая (защитная) R-C-VD цепочка, применяемая в повышающем ИППН.

В статье пояснена актуальность и сфера применения рассматриваемого вопроса. Показан механизм формирования коммутационных перенапряжений на паразитных индуктивностях в импульсных схемах. Рассмотрена схема включения защитной R-C-VD цепочки для ограничения перенапряжений. Рассмотрена работа ИППН с R-C-VD цепочкой с точки зрения формирования коммутационных перенапряжений. Для этого один период работы схемы разбит на временные интервалы, в каждом из которых приведено описание работы схемы. Рассмотрение произведено с учетом некоторых допущений, применимых к анализу таких схем. Приведены аналитические соотношения, позволяющие определить величину коммутационных перенапряжений исходя из параметров схемы. Получены соотношения, отражающие преобразование энергий между элементами схемы в процессе работы защитной цепочки. Приведена временная диаграмма, поясняющая работу схемы. На основе приведенного описания работы схемы и полученных аналитических соотношений сформулированы критерии выбора элементов защитной R-C-VD цепочки, акцентировано внимание на особенностях их выбора.

Областью применения данной работы являются схемы с транзисторами, работающими в ключевых режимах, например, схемы ИППН.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяются схемы с использованием полевых, биполярных и IGBT транзисторов, работающих в ключевых режимах. К таким схемам относятся импульсные блоки питания, преобразователи напряжения, привода двигателей, системы питания для специализированных технологий и т. д. [1–14]. Эти схемы (по сравнению со схемами, использующими транзисторы в активном режиме) обладают высоким КПД. Однако из-за высокой скорости коммутации токов в процессе выключения транзисторов появляются всплески перенапряжений, обусловленные наличием паразитных индуктивностей. Эти перенапряжения прикладываются к транзисторам и могут привести к их пробое. Для уменьшения перенапряжений применяют специальные демпфирующие цепочки [15–20]. Например, на основе ограничителей напряжения или цепочек R-C-VD типа, распространенный вариант которой рассматривается в данной статье.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим работу демпфирующей цепочки в составе повышающего ИППН. Цепь транзистора VT (рис. 1) содержит паразитную индуктивность L_p . Разрыв тока в этой цепи сопровождается перенапряжениями на L_p и, как следствие, может быть причиной пробоя транзистора VT. Перенапряжение U_{Lp} определяется скоростью коммутации di/dt тока в силовой цепи и величиной паразитных индуктивностей $U_{Lp} = L_p \cdot \frac{di}{dt}$.

Для ограничения всплесков напряжения на транзисторе возможно применение демпфирующей цепочки R1-C1-VD1, показанной на рис. 1. При выключении транзистора (t_0 на рис. 2) ток i_L дросселя L , протекая через диод VD1, конденсатор C1, паразитную индуктивность L_p и источник U , линейно во времени увеличивает на конденсаторе напряжение до уровня E . Постоянство тока $i_L = I_0$ в процессе коммутации объясняется тем, что интервал коммутации мал, а индуктивность L велика.

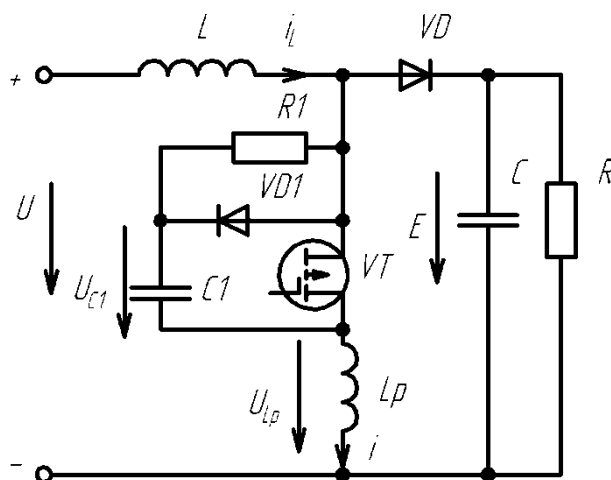


Рис. 1. Повышающий ИППН с демпфирующей R-C-VD цепочкой

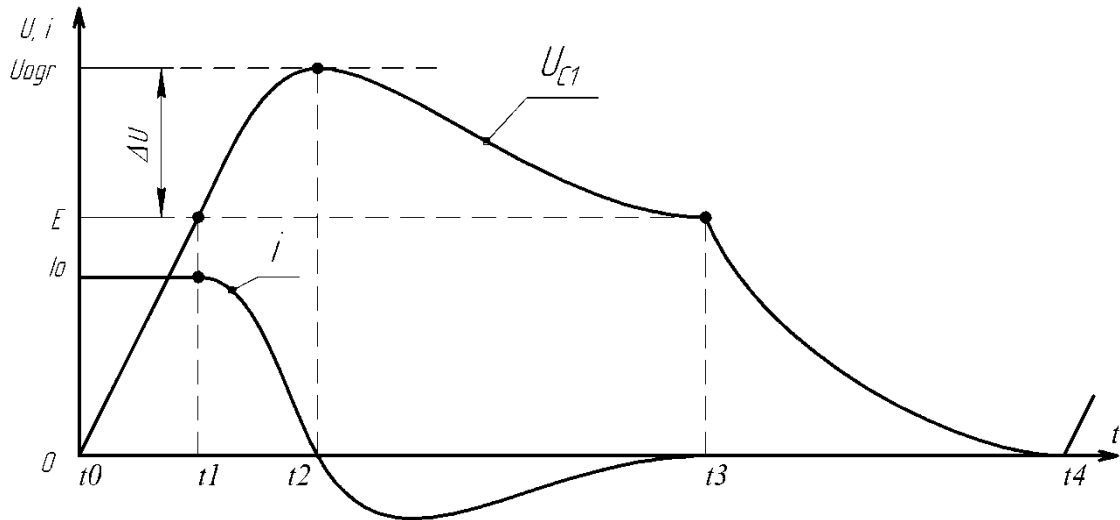


Рис. 2. Временные диаграммы процессов в демпфирующей цепочке

В момент $t1$ открывается VD , а процессы в цепи $VD1-C1-Lp$ развиваются по колебательному закону. Ток, протекающий через цепочку, описывается выражением $i(t)=I_0 \cdot \cos(\omega t)$, а напряжение, которое уже имеет постоянную составляющую $U_{C1}(0)=E$: $U_{C1}(t)=E+\Delta U \sin(\omega t)$. Этот этап ($t1-t2$) длится четверть периода колебаний T цепочки $Lp-C1$. К концу этого интервала ток Lp равен нулю, а напряжение на конденсаторе $U_{C1}(t2)=E+\Delta U$.

Для интервала ($t1-t2$) по II закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{C1}(t) + U_{Lp}(t) &= E \Rightarrow U_{C1} + Lp \frac{di(t)}{dt} = E \Rightarrow \\ \Rightarrow E + \Delta U \sin(\omega t) + Lp \frac{d(I_0 \cdot \cos(\omega t))}{dt} &= E \Rightarrow \quad (1) \\ \Rightarrow E + \Delta U \sin(\omega t) - Lp \cdot I_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) &= E \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta U &= Lp \cdot I_0 \cdot \omega. \end{aligned}$$

Подставив в (1) собственную частоту контура $Lp-C1$ $\omega = \frac{1}{\sqrt{Lp \cdot C1}}$, получим

$$\Delta U = I_0 \sqrt{\frac{Lp}{C1}}.$$

Для безопасной работы транзистора обычно задают максимальным рабочим напряжением на нем U_{ogr} или перенапряжением $\Delta U = U_{ogr} - E$, тогда искомая емкость конденсатора

$$C1 = Lp \left(\frac{I_0}{\Delta U} \right)^2. \quad (2)$$

В момент $t2$ ток i спадает до нуля, диод $VD1$ закрывается и конденсатор $C1$ начинает разряжаться до E через контур $Lp-C1-R1-VD-C$.

Составим схему замещения разрядного контура $C1$ на интервале ($t2-t3$) (рис. 3).

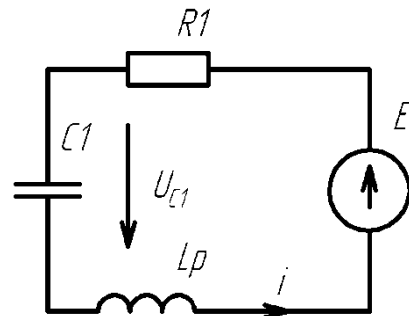


Рис. 3. Схема замещения разрядного контура конденсатора $C1$

За период работы преобразователя напряжение на конденсаторе C практически не изменяется, поэтому на схеме он заменен источником E . Начальное напряжение на конденсаторе $U_{C1}(t2)=E+\Delta U$.

Рассмотрим случай работы $R1-C1-VD1$ цепочки, когда разряд $C1$ до момента $t3$ включения транзистора происходит по аperiодическому закону с $U_{C1}(t3) \rightarrow E$. Для обеспечения аperiодического разряда необходимо,

чтобы $R1 > 2\sqrt{\frac{Lp}{C1}}$, с учетом (2):

$$R1 > 2\sqrt{\frac{Lp}{C1}} = 2 \frac{\Delta U}{I_0}. \quad (3)$$

При этом разряд будет определяться одной постоянной времени $\tau \approx C1 \cdot R1$. На интервале ($t2-t3$) энергия конденсатора $C1$ частично рассеивается на резисторе $R1$ и частично переходит в нагрузку R, C .

Разряд конденсатора $C1$ можно рассмотреть по переменной составляющей (рис. 4).

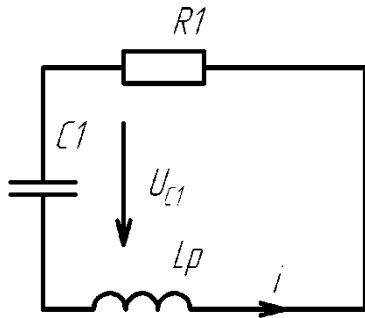


Рис. 4. Схемы замещения разрядного контура конденсатора $C1$ по переменной составляющей

На этой схеме источник E отсутствует, а начальное напряжение $U_{C1}(t_2) = \Delta U$. Из этой схемы видно, что к концу переходного процесса вся энергия $W_{R1(t_2-t_3)}$ конденсатора рассеивается в $R1$:

$$W_{R1(t_2-t_3)} = \frac{C1 \cdot \Delta U^2}{2}. \quad (4)$$

Интересно определить энергию, ушедшую в нагрузку за тот же интервал. Она равна разнице между изменением энергии в конденсаторе $C1$ в начале и конце процесса разряда и энергией, ушедшей в $R1$:

$$\begin{aligned} W_C &= W_{C1}(t_2) - W_{C1}(t_3) - W_{R1(t_2-t_3)} = \\ &= \frac{C1 \cdot (E + \Delta U)^2}{2} - \frac{C1 E^2}{2} - \frac{C1 \cdot \Delta U^2}{2} = \\ &= C1 \cdot E \cdot \Delta U. \end{aligned}$$

В момент t_3 транзистор VT вновь открывается и конденсатор $C1$ разряжается через него до нуля. При этом на резисторе $R1$ выделяется энергия

$$W_{R1(t_3-t_4)} = \frac{C1 \cdot E^2}{2}. \quad (5)$$

Средняя мощность, рассеиваемая в $R1$, определяется суммой энергий, выделяемых на резисторе $R1$ за периоды t_2-t_3 и t_3-t_4 (4) и (5) соответственно:

$$\begin{aligned} P &= \frac{C1 \cdot E^2 + C1 \cdot \Delta U^2}{2} f = \\ &= \frac{C1 \cdot (E^2 + \Delta U^2)}{2} f, \end{aligned} \quad (6)$$

где f – частота коммутации схемы.

Подставляем (2) в (6)

$$\begin{aligned} P &= Lp \left(\frac{Io}{\Delta U} \right)^2 \cdot \frac{E^2 + \Delta U^2}{2} f = \frac{Lp \cdot Io^2}{2} \cdot \frac{E^2 + \Delta U^2}{\Delta U^2} f = \\ &= W_{Lp} \frac{E^2 + \Delta U^2}{\Delta U^2} f = W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{E}{\Delta U} \right)^2 \right) \cdot f = \\ &= W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{E}{U_{ogr} - E} \right)^2 \right) \cdot f = W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{1}{U^* - 1} \right)^2 \right) \cdot f \end{aligned}$$

где $W_{Lp} = \frac{Lp \cdot Io^2}{2}$ – энергия, запасенная в паразитной индуктивности;
 $U^* = U_{ogr}/E$ – относительное значение амплитуды напряжения на VT .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные соотношения определяют критерии выбора номинала $R1$:

- Условие аperiodического разряда (3).
- Условие разряда $C1$ за (t_2-t_3) до E подразумевает выбор постоянной времени $\tau = R1 \cdot C1$ в несколько (2..5) раз меньше длительности периода t_{2-3} . Эту длительность можно найти как

$$t_{2-3} = t_3 - t_{0-1} - t_{1-2} = t_3 - \frac{C1 \cdot E}{Io} - T/4,$$

где t_3 – время выключенного состояния транзистора;

$t_{0-1} = \frac{C1 \cdot E}{Io}$ – время заряда конденсатора $C1$ до величины E ;

$t_{1-2} = T/4$ – время колебательного дозаряда $C1$ до U_{ogr} ;

$T = 2\pi \sqrt{Lp \cdot C1}$ – период собственных колебаний цепочки $C1-Lp$.

- Условие разряда конденсатора $C1$ за интервал t_3-t_4 открытого состояния транзистора до нуля. Разряд конденсатора $C1$ позволяет улучшить траекторию закрытия транзистора (уменьшить потери в нем на этапе закрытия). Выбираем постоянную времени $\tau = R1 \cdot C1$ в несколько (2..5) раз меньше длительности t_3-t_4 .

– Необходимо проверить, что ток разряда конденсатора $C1$ не будет сильно нагружать транзистор VT , например $E/R < Io$.

При выборе конденсатора следует обратить внимание на то, что он должен был способен работать на частоте f с максимальным рабочим напряжением $E + \Delta U$ в режиме полного разряда.

Диод должен быть быстродействующим (с временем восстановления $t_{rv} \ll \frac{T}{4} = \frac{2\pi \sqrt{Lp \cdot C1}}{4}$) с максимальным рабочим напряжением не менее $E + \Delta U$.

ВЫВОДЫ

Защитная R-C-VD цепочка, установленная параллельно транзистору, позволяет облегчить коммутацию транзистора и ограничить коммутационные перенапряжения на нем. Энергия из паразитной индуктивности Lp сначала поступает в конденсатор цепочки, а затем выделяется на ее резисторе. Емкость конденсатора выбирается исходя из величин Lp и допустимого уровня

перенапряжений ΔU . Выбор номинала резистора более сложен, поскольку его величина должна удовлетворять ряду вышеприведенных требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для защиты транзистора от перенапряжений можно воспользоваться описанной защитной R-C-VD цепочкой с элементами, выбранными согласно вышеприведенным рекомендациям. Следует отметить, что в статье рассмотрен частный случай работы R-C-VD цепи в соответствии с указанными допущениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивашин В.В., Медведев В.А., Позднов М.В. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2177840 от 10.12.1999.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний // Наука – производству. 2004. № 4. С. 46–47.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Вибрационный источник крутильных колебаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 56–59.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Наземный электромагнитный вибрационный сейсмоисточник : патент на изобретение № 2253136 от 25.02.2004.
- Иванников Н.А., Ивашин В.В., Певчев В.П., Прядилов А.В. Импульсный электромагнитный источник сейсмических волн : патент на изобретение № 2466429 от 04.05.2011.
- Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 1. С. 72–75.
- Ивашин В.В., Медведев В.А., Пчелкин Д.В. Электромагнитный привод резонансного вибратора : патент на изобретение № 2146412 от 05.01.1998.
- Бар В.И., Ивашин В.В., Медведев В.А. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2160494 от 16.02.1999.
- Ивашин В.В., Медведев В.А. Электромагнитный привод возвратно-поступательного движения : патент на изобретение № 2046540 от 22.04.1991.
- Бар В.И., Медведев В.А., Макарычева О.А., Семочкина Н.Б. Электромагнитные и тепловые процессы в импульсных установках индукционного нагрева ферромагнитной стали : депонированная рукопись № 742-B2005 25.05.2005.
- Кудинов А.К., Узбеков К.Х., Прядилов А.В. Мощный транзисторный преобразователь для заряда емкостного накопителя энергии // Наука – производству. 2004. № 4. С. 54–56.
- Шевцов А.А., Глибин Е.С. Имитационное моделирование совместной работы статических компенсаторов и контактной сварочной машины // Электротехника. 2010. № 4. С. 34–38.
- Глибин Е.С., Шевцов А.А. Моделирование функционирования компенсационных устройств совместно с контактными сварочными установками // Сварочное производство. 2009. № 5. С. 17–21.
- Кудинов А.К. Преобразователь постоянного напряжения : патент на изобретение № 2254662 от 29.12.2003.
- Данилов В.С., Лукьянов К.С., Моисеев Е.А. Анализ и выбор демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 109–115.
- Моисеев Е.А. Построение демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 1. С. 147–152.
- Угринов П. Ограничение напряжения на ключевом транзисторе в одноконтурных преобразователях напряжения // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 62–65.
- Рахматов А. З., Абдулхаев О. А., Каримов А.В., Каландаров Ж.Ж., Скорняков С.П. Малогабаритные бескорпусные полупроводниковые ограничители напряжения // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 54–55.
- Кадуков А. TVS-диоды – полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях // Компоненты и технологии. 2001. № 10. С. 32–36.
- Ромадина И. Электронные компоненты компании ON Semiconductor для защиты электрических цепей от импульсного перенапряжения // Компоненты и технологии. 2009. № 101. С. 73–76.

REFERENCES

- Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pozdnov M.V. *Rezonansniy vibrator* [Resonance vibrator]. Patent RF no. 2177840, 1999. (In Russian).
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Electromagnetic vibrator with controlled vibration frequency. Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 46–47.
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Vibrating source of rotary fluctuations. Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 56–59.
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Nazemny elektromagnitniy vibratsionniy seismoistochnik* [Terrestrial electromagnetic vibrational seismosource]. Patent RF no. 2253136, 2004. (In Russian).
- Ivannikov N.A., Ivashin V.V., Pevchev V.P., Pryadilov A.V. *Impulsniy elektromagnitniy istochnik seismicheskikh voln* [Pulsed electromagnetic source of seismic waves]. Patent RF no. 2466429, 2011. (In Russian).
- Ivashin V.V., Kudinov V.V., Pevchev V.P. *Electromagnetic the drive for impulse and vibroimpulse technologies. Izvestiya visshikh uchebnikh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pchelkin D.V. *Elektromagnitniy privod rezonansnogo vibratora* [Electromagnetic drive of the resonant vibrator]. Patent RF no. 2146412, 1998. (In Russian).
- Bar V.I., Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Rezonansniy vibrator* [Resonant vibrator]. Patent RF no. 2160494, 1999. (In Russian).
- Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Elektromagnitniy privod vozvratnopolstupatel'nogo dvizheniya* [Electromagnetic

- drive of back and forth motion]. Patent RF no. 2046540, 1991. (In Russian).
10. Bar V.I., Medvedev V.A., Makaricheva O.A., Semochkina N.B. *Elektromagnitnye i teploviye protsessy v impulsnikh ustanovkakh induktsionnogo nagreva ferromagnitnoy stali* [Electromagnetic and thermal processes in pulse installations of induction heating of ferromagnetic steel]. Depon. manusc. no. 742-B2005 25.05.2005.
 11. Kudinov V.V., Uzbekov K.H., Pryadilov A.V. The powerful transistor converter for a charge of the capacitor. *Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 54–56.
 12. Shevtsov A.A., Glibin E.S. Simulation modeling of joint operation of static compensators and contact welding machine. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 34–38.
 13. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Simulation of functioning of compensating devices jointly with the contact welding machines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 5, pp. 17–21.
 14. Kudinov A.K. *Preobrazovatel postoyannogo napryazheniya* [Direct-voltage transducer]. Patent RF no. 2254662, 2003. (In Russian).
 15. Danilov V.S., Lukyanov K.S., Moiseev E.A. The analysis and choice of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 4, pp. 109–115.
 16. Moiseev E.A. Creation of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 147–152.
 17. Ugrinov P. Restriction of voltage on the key transistor in single-cycle converters of voltage. *Silovaya elektronika*, 2004, no. 1, pp. 62–65.
 18. Rakhmatov A.Z., Abdulkhaev O.A., Karimov A.V., Kalandarov G.G., Skornyakov S.P. Small-sized packageless semiconductor limiters of voltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2011, no. 9, pp. 54–55.
 19. Kadukov A. TVS diodes – semiconductor devices for restriction of dangerous revoltage in electronic circuits. *Komponenti i tekhnologii*, 2001, no. 10, pp. 32–36.
 20. Romadina I. Electronic components of the ON Semiconductor company for protection of electric circuits against a pulse overvoltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2009, no. 101, pp. 73–76.

THE PRICIPLES OF SELECTION OF THE ELEMENTS OF PROTECTIVE R-C-VD CIRCUIT USING THE EXAMPLE OF A CONSTANT VOLTAGE PULSE CONVERTER

© 2015

M.V. Pozdnov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
A.V. Pryadilov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: damping circuit; pulse converter; semiconductor converter; transistor over-voltage; switching processes.

Abstract: This article covers the principles of selection of protective R-C-VD chain elements using the example of a constant voltage pulse converter (CVPC).

The aim of this research is the reasonable choice of protective chain parameters necessary for keeping the switching over-voltage on a safe level.

The objectives of this work are to describe the processes of formation of switching over-voltages with the partition of switching processes for the periods of time, the revealing of the over-voltages values based on circuit parameters, and the formulation of recommendations on the selection of parameters of protective R-C-VD chains.

The object of this study is the damping (protective) R-C-VD circuit used in the boost constant voltage pulse converter.

The article explains the relevance and the field of application of the issue under consideration. The article presents the mechanism of formation of switching over-voltages in the spurious inductances in the switching circuits. The authors considered the connection diagram of protective R-C-VD circuit for limitation of the over-voltage and the work of a constant voltage pulse converter with R-C-VD circuit in the terms of forming switching over-voltages. For this reason, one circuit operation period was divided into time intervals, each of which describes the circuit operation.

The research was carried out taking into account certain assumptions applicable to the analysis of such circuits. The authors introduce the analytical relations that allow determining the value of switching over-voltage on the basis of the circuit parameters. The authors obtained the relations reflecting the energies transformation between the circuit elements in the process of protective circuit operation. The flow chart illustrating the circuit operation is presented. On the base of the above description of the circuit operation and obtained analytical relations, the criteria for selection of protective R-C-VD circuit elements have been formulated focusing on the features of their selection.

The application field of this research is the schemes with transistors operating in key modes, such as the schemes of constant voltage pulse converter.