

УДК 621.3.088.6

Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов

Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания

Рассмотрено воздействие осциллографа на фронты импульса тока обратного восстановления быстровосстанавливающегося диода. Установлено, что при разных длительностях фронта обратного напряжения и полосы пропускания осциллографа на переднем фронте семейства кривых тока обратного восстановления диода имеется точка пересечения, численно равная полусумме прямого тока и максимального тока восстановления (ток короткого замыкания). С помощью модели осциллографа оценено его влияние на вторую отсчетную точку времени обратного восстановления, расположенную на экспоненциальной части импульса тока. Предложенный способ коррекции экспоненциальной части импульса тока обратного восстановления быстровосстанавливающегося диода совместно с выбором первой отсчетной точки позволяет уменьшить погрешность измерения времени обратного восстановления при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания. Время обратного восстановления диода, полученное на осциллографах Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A, расходится на 1,7%, что в 4 раза меньше по сравнению со стандартным методом.

Ключевые слова: полупроводниковый диод, обратный ток диода, измерение времени обратного восстановления, переходная характеристика осциллографа, измерительный тракт.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-37-41

Явление обратного восстановления диода является одним из ключевых процессов, протекающих в диоде, которое необходимо учитывать при реализации устройства. Процесс обратного восстановления диода способен вызвать аномалии в работе схемы. Например, может являться инициатором самоподдерживающихся квазипериодических колебаний, возрастания выходного напряжения схемы или вывести транзистор из строя в схеме непосредственного преобразователя повышающего типа [1–4] и т.д. Природа возникновения этого явления вызвана тем, что при переходе из прямого смещения в обратное в диоде начинает протекать заряд обратного восстановления, т.е. электроны должны вернуться в n -область, а дырки – в p -область, тогда они могут рекомбинировать на аноде и катоде соответственно. Время, за которое происходит переход из прямого смещения диода в обратное, называется временем обратного восстановления $t_{\text{вос}}$ [5–7].

Существует стандарт [8], который регламентирует требования к процессу измерения времени обратного восстановления диода. В соответствии с ним длительность переходной характеристики осциллографа должна быть не более $0,2t_{\text{вос}}$. Эта граница по большей части предназначена для фиксации быстрого переднего фронта импульса тока обратного восстановления диода, нежели для более медленной экспоненциальной части. Осциллографы с длительностью фронта переходной характеристики менее 400 пс имеют очень высокую стоимость, что делает процесс измерения времени дорогостоящим и долгим из-за их производственной загруженности. Использование низкочастотных осциллографов увеличивает погрешность измерения и искажает как передний, так и задний фронт импульса обратного тока восстановления диода.

Цель работы заключается в уменьшении погрешности измерения времени обратного восстановления диода при использовании осциллографов с узкой полосой.

Метод измерения времени обратного восстановления диода

В качестве объекта исследования используется диод 2Д510 производства АО «НИИПП». Его паспортное время обратного восстановления составляет 2 нс [9]. Ток обратного восстановления диода 2Д510 содержит два фронта: первый имеет быстрый отклик, а второй – более затяжной экспоненциальный (рис. 1).

Измерение времени восстановления $t_{\text{вос}}$ (см. рис. 1, пунктирная линия) в соответствии со стандартом [8] приводит к систематической погрешности измерения, так как к действительному времени восстановления добавляется половина длительности фронта импульса обратного напряжения.

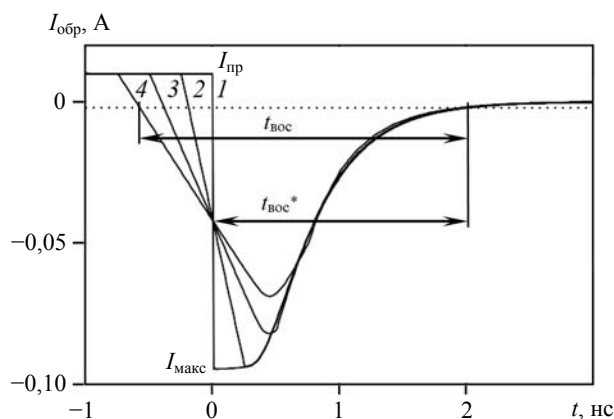


Рис. 1. Ток обратного восстановления диода 2Д510. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют длительности фронта 0; 0,5; 1; 1,5 нс

При выборе начала отсчета времени восстановления будем руководствоваться правилом, описанным в статье [10]. Положение первой отсчетной точки при разной длительности фронта обратного напряжения (см. рис. 1) и полосы пропускания осциллографа определяется как полусумма прямого тока $I_{пр}$ и максимального тока восстановления $I_{макс}$. Вторая точка отсчета будет использоваться на уровне -2 мА.

Моделирование экспоненциальной части обратного тока диода

Модель осциллографа, учитывающая его влияние на экспоненциальную часть импульса тока обратного восстановления диода, описывается следующей импульсной характеристикой:

$$h(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right). \quad (1)$$

До моделирования целесообразно провести оценку постоянной времени экспоненциальной части на реальном отклике диода. Экспоненциальная часть импульса тока описывается

$$i(t) = I_{обр.макс} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (2)$$

Логарифмируя левую и правую часть (2), получим

$$\tau(t) = \frac{-t}{\ln(i(t))}. \quad (3)$$

Используя (2), построим график зависимости постоянной времени экспоненциального фронта обратного тока диода от времени (рис. 2).

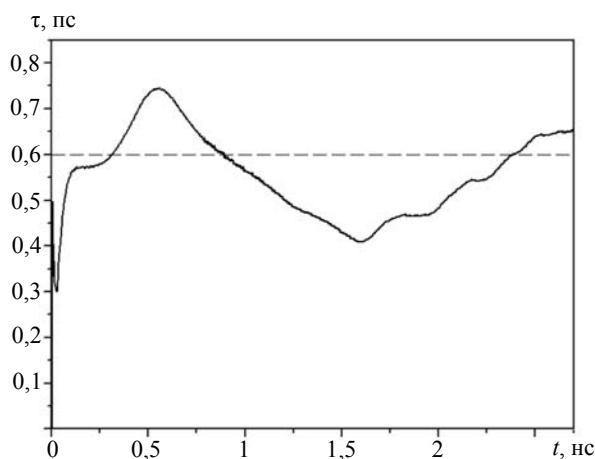


Рис. 2. Зависимость постоянной времени экспоненциального фронта обратного тока диода от времени

Среднее значение постоянной времени на рис. 2 составило 0,6 нс. На рис. 3 представлен идеальный (кривая 1) и реальный экспоненциальный фронт обратного тока диода (кривая 2).

Идеальный экспоненциальный фронт пропускается через модель осциллографа с разными постоянными времени. Данный прием позволяет сравнивать осциллографы относительно постоянной времени экспоненциального фронта диода. Рисунок 4 иллюстрирует результаты моделирования обратного

тока диода в зависимости от постоянной времени импульсной характеристики осциллографа (длительности фронта переходной характеристики осциллографа).

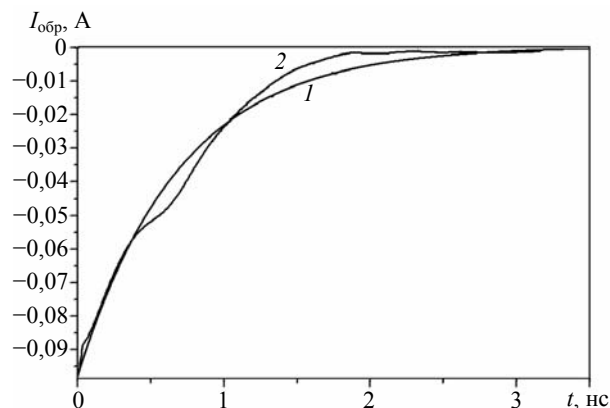


Рис. 3. Экспоненциальный фронт обратного тока диода. Кривые 1 и 2 соответствуют идеальному и реальному фронту

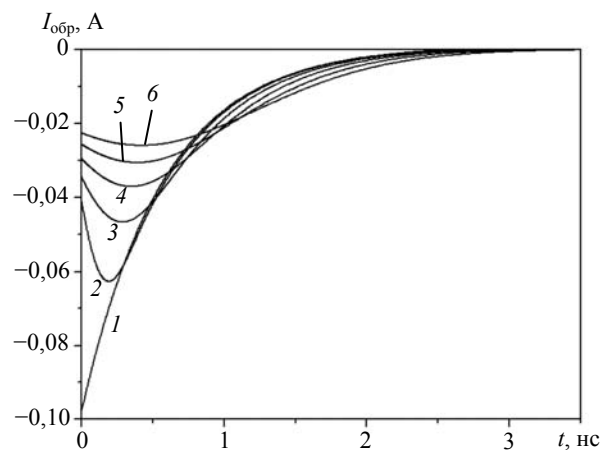


Рис. 4. Семейство кривых экспоненциальной части обратного тока диода. Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют постоянным времени 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 нс

Из рис. 4 видно, что при увеличении постоянной времени импульсной характеристики осциллографа происходит уменьшение амплитуды обратного тока диода. Кроме этого, происходит смещение экспоненциальной части вправо относительно нулевого воздействия на нее, вследствие чего происходит увеличение измеренного времени обратного восстановления (по уровню -2 мА).

На рис. 5 приведена зависимость относительной погрешности измерения времени обратного восстановления диода от длительности переходной характеристики осциллографа.

При увеличении постоянной времени (см. рис. 5) наблюдается возрастание относительной погрешности измерения. То есть при уменьшении полосы пропускания осциллографа происходит увеличение погрешности измерения. Например, для осциллографа Rigol DS6064 с полосой пропускания 600 МГц [11] и длительностью фронта переходной характеристики 0,6 нс относительная погрешность составляет 9,8%, а для Agilent DSO9254A с полосой

пропускания 2500 МГц [12] и длительностью фронта переходной характеристики 0,14 нс равна 1,2%. Стоит отметить, что относительная погрешность осциллографа с длительностью фронта переходной характеристики 0,6 нс ($0,3t_{\text{вос}}$) удовлетворяет стандарту [8], но при этом сам осциллограф не соответствует условию $0,2t_{\text{вос}}$ того же стандарта.

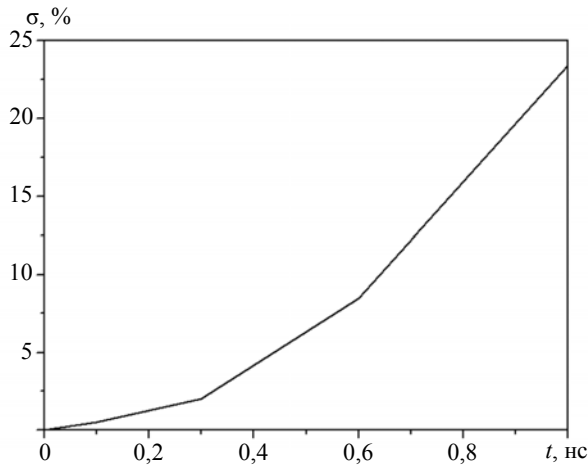


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности измерения времени обратного восстановления диода от длительности переходной характеристики осциллографа

Эксперимент и его анализ

Рисунок 6 иллюстрирует блок-схему экспериментальной установки. Установка включает в себя формирователь пикосекундных импульсов [15], обратное напряжение которого подается на исследуемый диод VD. Далее на осциллографе фиксируется сигнал импульса тока обратного восстановления диода. R1 и R2 являются согласованными нагрузками (50 Ом) формирователя и осциллографа соответственно.

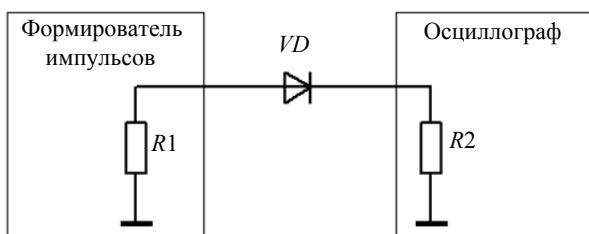


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки

На рис. 7 показаны кривые обратного тока диода 2Д510, полученные в ходе измерения с помощью Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A. Кривые восстановления на рис. 6 расположены в соответствии с правилом выбора первой отсчетной точки, описанным в статье [10].

Расхождение между временами на рис. 7 составило 6,6%. Осциллограф Rigol DS6064 существенно искажает экспоненциальную часть импульса обратного тока диода. Для достижения цели работы решено провести коррекцию экспоненциальной части.

Коррекция сигнала обратного тока диода происходит с помощью трансверсального фильтра, реа-

лизованного в среде графического программирования LabVIEW. Трансверсальный фильтр включает в себя многоотводную линию задержки, выходной сигнал которого получается в результате суммирования задержанных τ и взвешенных C входных сигналов [13–14].

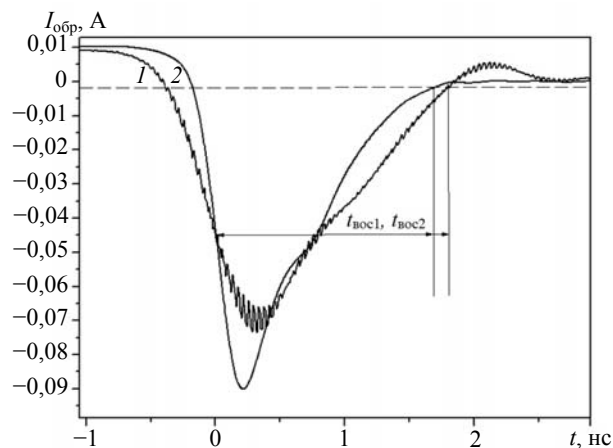


Рис. 7. Ток обратного восстановления диода 2Д510. Кривые 1 и 2 соответствуют осциллограммам Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A

Настройка трансверсального фильтра происходит при калибровке измерительного тракта следующим образом: на вход фильтра подается сигнал с формирователя импульсов (рис. 8, кривая 1) [15]. Далее происходит варьирование коэффициентов фильтра (таблица) с целью минимизирования осцилляций на нижней плоской вершине обратного напряжения (см. рис. 8, кривая 2).

Коэффициенты трансверсального фильтра

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
340p	10p	40p	170p	290p
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0,3	4	-0,4	0,4	-0,04
τ_6	τ_7	τ_8	τ_9	
310p	70p	300p	625p	
C_6	C_7	C_8	C_9	
-0,1	-0,2	-0,16	-0,1	

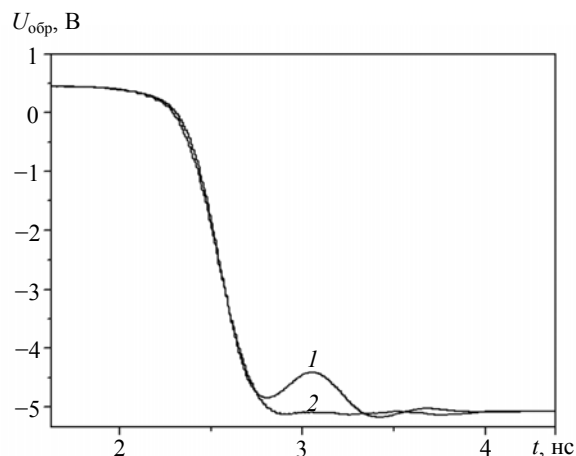


Рис. 8. Обратное напряжение формирователя. Кривые 1 и 2 соответствуют сигналам на входе и выходе фильтра

Данный подход позволяет до определенной степени (в пределах погрешности реализации трансверсального фильтра корректирующей функции) скомпенсировать влияние измерительного тракта от формирователя пикосекундных импульсов и до входного усилителя осциллографа.

Далее были пропущены импульсы тока обратного восстановления диода 2Д510, полученные с помощью Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A, через трансверсальный фильтр и получены кривые обратного тока диода, представленные на рис. 9.

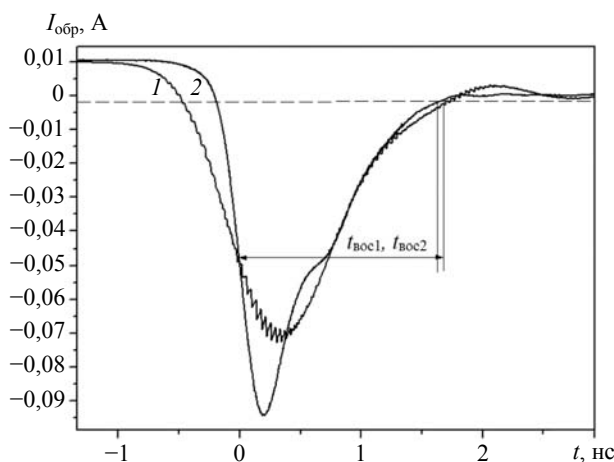


Рис. 9. Ток обратного восстановления диода 2Д510 после коррекции. Кривые 1 и 2 соответствуют осциллограммам Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A

Рисунок 9 иллюстрирует результативность проведенной коррекции обратного тока диода. Из рис. 9 видно, что экспоненциальная часть обратного тока диода, полученного с помощью Rigol DS6064, близка по форме с сигналом, полученным с помощью Agilent DSO9254A. Расхождение между $t_{\text{вос}}$ составило 1,7%. С помощью коррекции удалось снизить расхождения во временах в 4 раза. Это позволяет использовать осциллографы с узкой полосой пропускания. При этом будет получаться близкое по значению время, как и с помощью высокочастотного осциллографа.

Заключение

Показано повышение метрологического качества измерения времени обратного восстановления при использовании узкополосных осциллографов посредством выбора начальной отсчетной точки и коррекции экспоненциального фронта импульса тока обратного восстановления диода. Предложенная коррекция экспоненциальной части импульса тока обратного восстановления диода позволяет совместно с правилом выбора первой отсчетной точки [10] уменьшить расхождение во временах, полученных на низкочастотном и высокочастотном осциллографах. Эксперимент показал, что применение осциллографа с длительностью фронта переходной характеристики $0,3t_{\text{вос}}$ позволяет получать близкое по значению время обратного восстановления, как при длительности фронта переходной характеристики $0,2t_{\text{вос}}$, оговоренной в стандарте [8]. При этом по-

грешность измерения составляет 1,7%, что меньше в 4 раза по сравнению со стандартным методом.

Литература

1. Karadzinov L.V. Analysis of the Influence of Diode Reverse Recovery on the Operation and Design of High-Frequency Rectifiers / L.V. Karadzinov, D.C. Hamill // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, No. 2. – P. 386–398. DOI: 10.1109/63.838112
2. Deane J.H.B. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems / J.H.B. Deane, D.C. Hamill // IEEE Trans. Power Electron. – 1991. – Vol. 5, No. 2. – P. 260–268. DOI: 10.1109/63.56516
3. Simple piecewise-linear diode model for transient behavior / L.V. Karadzinov, D.J. Jefferies, G.L. Arsov, J.H.B. Deane // Int. J. Electron. – 1996. – Vol. 78, No. 1. – P. 143–160. DOI: 10.1080/00207219508926148
4. Arsov G.L. Influence of the circuit parameters on the DH phenomenon / G.L. Arsov, L.V. Karadzinov // 8th Symp. Power Electron. – 1995. – Vol. 1, No. 1. – P. 253–258. DOI: 10.1109/PESC.2001.954036
5. Троян П.Е. Твердотельная электроника: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2006. – 321 с
6. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
7. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 463 с.
8. ГОСТ 18986.8–73. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1973 – 5 с.
9. Сайт компании АО «НИИПП». Диоды импульсные 2Д510А/НТ, 2Д510А9/НТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.niipp.ru/catalog/detail.php?ID=239>, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
10. Семенов Э.В. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов / Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2018): матер. 28-й Междунар. Крым. конф. – Севастополь: Вебер, 2018. – С. 1269–1273.
11. Сайт компании Rigol. Осциллограф Rigol DS6064 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rigol.su/index.php?route=product/product&product_id=136, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
12. Сайт компании Keysight Technologies. Осциллограф DSO9254A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Infinitium_prog_guide.pdf, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
13. Богнер Р. Введение в цифровую фильтрацию. – М.: Мир, 1976. – 276 с.
14. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.
15. Шевченко Г.М. Измерение времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – 2018. – Т. 7. – С. 201–204.

Шевченко Глеб Михайлович

Магистрант каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-960-976-19-91
Эл. почта: gleb95@inbox.ru

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиоэлектроники
и систем связи (РСС) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-909-391-11-76
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Shevchenko G.M., Semyonov E.V.

**Reducing the measurement error of the time of the return
recovery of rapidly recovering diodes using oscilloscopes
with a narrow bandwidth**

The effect of an oscilloscope on the fronts of a current pulse of a reverse recovery of a rapidly recovering diode is considered. It is established that at different durations of the reverse voltage front and oscilloscope bandwidth, at the leading edge of the family of reverse diode recovery current curves, there is an intersection point that is numerically equal to the sum of the forward current and maximum recovery current (short circuit current). Using an oscilloscope model, its effect on the second reference point of the reverse recovery time, located on the exponential part of the current pulse, is estimated. The proposed method for correcting the exponential part of the current pulse of the reverse recovery of a fast recovery diode, together with the choice of the first reference point, allows to reduce the measurement error of the reverse recovery time when using oscillographs with a narrow bandwidth. The reverse recovery time of the diode, obtained on an Rigol DS6064 and Agilent DSO9254A oscilloscopes, diverges by 1,7%, which is 4 times less than the standard method.

Keywords: semiconductor diode, reverse diode current, reverse recovery time measurement, oscilloscope transient response, measuring path.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-37-41

References

1. Karadzinov L.V., Hamill D.C. Analysis of the Influence of Diode Reverse Recovery on the Operation and Design of High-Frequency Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 386–398. doi: 10.1109/63.838112
2. Deane J.H.B., Hamill D.C. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems. *IEEE Trans. Power Electron*, 1991, vol. 5, no. 2, pp. 260–268. doi: 10.1109/63.56516
3. Karadzinov L.V., Jefferies D.J., Arsov G.L., Deane J.H.B. Simple piecewise-linear diode model for transient behavior. *Int. J. Electron*, 1996, vol. 78, no. 1, pp. 143–160. doi: 10.1080/00207219508926148
4. Arsov G.L., Karadzinov L.V. Influence of the circuit parameters on the DH phenomenon. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, vol. 1, no. 1, pp. 253–258. doi: 10.1109/PESC.2001.954036.
5. Troyan P.E. *Tverdotel'naya elektronika: Uchebnoe posobie* [Solid State Electronics: A Tutorial]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2006. 321 p. (in Russ.).
6. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. *Poluprovodnikovye pribory* [Semiconductor devices]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990. 576 p. (in Russ.).
7. Starosel'skij V.I. *Fizika poluprovodnikovyh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Ljubercy, Jurajt Publ., 2016. 463 p. (in Russ.).
8. GOST 18986.8-73. Semiconductor diodes. The method of measuring the reverse recovery time. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 5 p. (in Russ.).
9. Website of corporation «NIIPP». Pulse diodes 2Д510А/НТ. Available at: <https://www.niipp.ru/catalog/detail.php?ID=239>, free (Accessed: May 15, 2019).
10. Semenov E.V., Malahovskij O.Ju. Umen'shenie pogreshnosti izmerenija vremeni obratnogo vosstanovlenija bystrovosstanavlivajushihhsja diodov [Reducing the measurement error of the recovery time of rapidly recovering diodes]. SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (KryMiKo '2018): Materialy 28-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii [Microwave equipment and telecommunication technologies (KryMiKo 2018)]. Proc. materials of the 28th International Crimean Conference]. Sevastopol, Weber Publ., 2018. pp. 1269–1273. (in Russ.).
11. Website of corporation Rigol. Oscilloscope Rigol DS6064. Available at: http://rigol.su/index.php?route=product/product&product_id=136, free (Accessed: May 15, 2019).
12. Website of corporation Keysight Technologies. Oscilloscope DSO9254A. Available at: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Infiniium_prog_guide.pdf, free (Accessed: May 15, 2019).
13. Bogner R. *Vvedenie v cifrovuju fil'traciju* [Introduction to digital filtering]. Moscow, MIR Publ., 1976. 276 p.
14. Hemming R.V. *Cifrovye fil'try* [Digital filters]. Moscow, Soviet radio Publ., 1982. 224 p. (in Russ.).
15. Shevchenko G.M. Measurement of the recovery time of rapidly recovering diodes. International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. *Perspective of fundamental Sciences development*, 2018, vol. 7, pp. 201–204. (in Russ.).

Gleb M. Shevchenko

Graduate student Department Industrial Electronics,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-960-976-1991
Email: gleb95@inbox.ru

Edward V. Semyonov

Doctor of Engineering, Professor, Department Radio
Electronics and Communication Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-909-539-11-76
Email: edwardsemyonov@narod.ru