

УДК 621.314.222.6:517.5

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАТОРОВ ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ГЕНЕРАТОРА С ЦЕЛЬЮ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

¹Васильева О.В., ²Лавринович А.В.

¹ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: vasileva.o.v@mail.ru;

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Проанализировано влияние типа коммутатора на параметры выходного импульса генератора по схеме Введенского. Предложена методика выбора коммутатора при использовании генератора для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Исследовались коммутаторы: ртутное реле, механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01 и кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb, геркон газовый типа КЭМ и геркон вакуумный типа МКА-52141-ГрА, разрядники низкого напряжения типа NENSHI-230-07. Методика сопоставления коммутаторов заключалась в сравнении между собой импульсов, регистрируемых на согласованной нагрузке на выходе созданного кабельного генератора. Было проведено сравнение исходного и восстановленного сигналов при разном количестве гармоник, выбрано минимально необходимое количество гармоник. Предложена методика для сравнения спектров амплитуд в виде спектральной плотности мощности. Исследование осуществлялось в среде MathCAD с помощью дискретного преобразования Фурье.

Ключевые слова: импульсный генератор, коммутатор, газовый разрядник, импульс, трансформатор, дискретное преобразование Фурье, энергия

STUDY OF NANOSECOND PULSE SWITCHES FOR LOW VOLTAGE GENERATOR FOR DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMERS

¹Vasileva O.V., ²Lavrinovich A.V.

¹National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: vasileva.o.v@mail.ru;

²Institute of high-current electronics of RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES, Tomsk

Influence of type of the switchboard on parameters of an output impulse of the generator according to Vvedensky's scheme is analysed. The technique of a choice of the switchboard is offered when using generator for diagnostics of a mechanical condition of windings of power transformers. Switchboards were investigated: the mercury relay, the mechanical polzunkovy BPK-2M.01 switch and the push-button DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb switch, геркон gas the KEM type and геркон vacuum like MKA-52141-GRA, rated sportsmen of a low voltage of the NENSHI-230-07 type. The technique of comparison of switchboards consisted in comparison among themselves the impulses registered on coordinated loading at the exit of the created cable generator. Comparison of the initial and restored signals was carried out at different quantity of harmonicas, minimum necessary quantity of harmonicas is chosen. The technique for comparison of ranges of amplitudes in the form of the spectral density of power is offered. Research was carried out in the environment of MathCAD by means of Fourier's discrete transformation.

Keywords: pulse generator, switchboard, gas discharge switch, impulse, transformer, Fourier's discrete transformation, energy

Известен метод диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов низковольтными импульсами микросекундной длительности, предложенный в 1966 г. [6]. В случае изменения геометрии обмоток (сдвиг витков относительно друг друга, замыкание между отдельными витками, «выпучивание» витков в радиальном направлении, присоединение витков к корпусу трансформатора и т.п.) импульс отклика меняется, что и позволяет судить о механическом состоянии обмоток [5].

При этом амплитуда импульса должна быть более 200 В, длительность фронта импульса 5...15 нс, длительность импульса на полувывоте 300...500 нс. Промышленностью генераторы с совокупностью таких параметров не выпускаются. Одна из проблем на пути создания таких генераторов – коммутатор. От параметров коммутатора зависит не только длительность фронта формируемого импульса, но повторяемость формы

создаваемого импульса. В связи с этим нами была поставлена задача проанализировать импульс на выходе генератора при различных типах коммутаторов, чтобы определить наиболее приемлемый коммутатор, генератор был собран по схеме Введенского [2]. Исследовались коммутаторы: ртутное реле, механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01 и кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb, геркон газовый типа КЭМ и геркон вакуумный типа МКА-52141-ГрА, разрядники низкого напряжения типа NENSHI-230-07 [3].

Методика сопоставления коммутаторов заключалась в сравнении между собой импульсов, регистрируемых на согласованной нагрузке на выходе созданного кабельного генератора (рис. 1): волновое сопротивление кабеля типа РК-75-3-11 составляло 75 Ом, длина кабеля 135 м, что соответствовало длине импульса на полувывоте 675 нс.

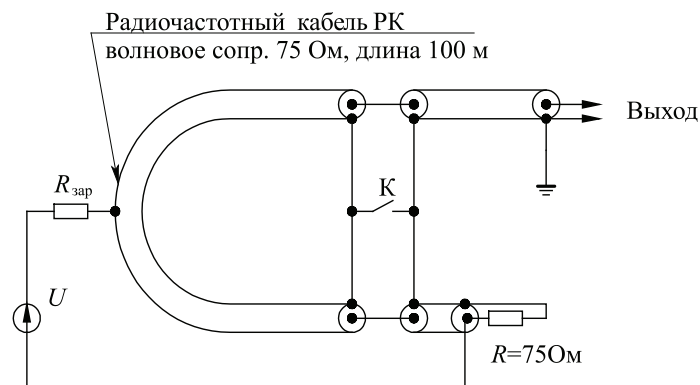


Рис. 1. Электрическая схема генератора: K – исследуемый коммутатор

Типичные импульсы, полученные в результате испытания разных коммутаторов,

приведены на рис. 2, где U – напряжение в относительных единицах, t – время, нс.

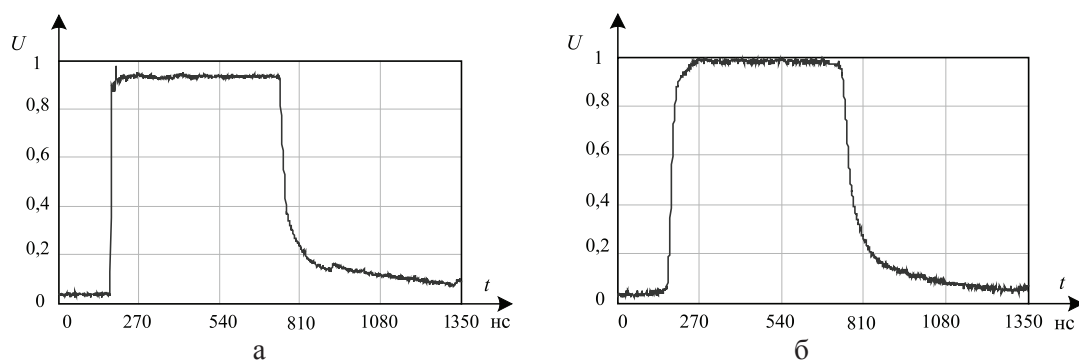


Рис. 2. Импульсы напряжения, зарегистрированные на согласованной нагрузке на выходе генератора:

a – ртутное реле; $б$ – механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01; $в$ – кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb; $г$ – геркон газовый типа КЭМ; $д$ – геркон вакуумный МКА-52141-ГрА; $е$ – газовый разрядник NENSHI 230-07

Визуально импульсы отличаются в основном на фронте. Кроме этого, видно некоторое различие и в плоской части импульсов. Это обусловлено свойствами применяемых коммутаторов, т.к. остальные параметры генератора, включая индуктивность присоединения коммутатора, оставались во всех экспериментах одинаковыми.

Методика

Для объективного сравнения полученных импульсов между собой нами был применен метод быстрого дискретного Фурье-анализа. С помощью стандартной программы MathCAD импульс раскладывался на составляющие ряда Фурье F :

$$F = FFT(U), \quad (1)$$

где U – мгновенное значение напряжения на согласованной нагрузке на выходе генератора.

Длительность периода следования импульсов принималась равной двойной длине формируемого импульса и во всех случаях оставалась постоянной, так как длина периода при разложении в ряд Фурье

влияет на спектр частот и фазочастотную характеристику. В нашем случае длительность импульса, измеренная на полувысоте, составляла 675 нс, а длительность периода следования импульсов соответственно 1350 нс. Перед разложением в ряд Фурье все импульсы нормировались по амплитуде.

При разложении (1) встал вопрос, на какое количество гармоник необходимо разлагать исходный импульс. Мы использовали следующую процедуру. Разложили импульс на 150 гармоник, а потом обратным преобразованием восстанавливали исходный импульс, используя ограниченное количество гармоник. Результаты приведены на рис. 3.

Из приведенных изображений восстановленных импульсов видно, что минимальное количество гармоник, на которое необходимо раскладывать исходный импульс, составляет 50 (рис. 3, г).

Экспериментальная часть

Эффективность метода продемонстрирована на примере сопоставления ампли-

тудно-частотных и фазочастотных характеристик различных типов используемых коммутаторов (амплитудно-частотные характеристики в относительных единицах

приведены на рис. 4, а фазочастотные характеристики на рис. 5, где f – частота соответствующей гармоники, $f = 0,74$ МГц – частота основной гармоники).

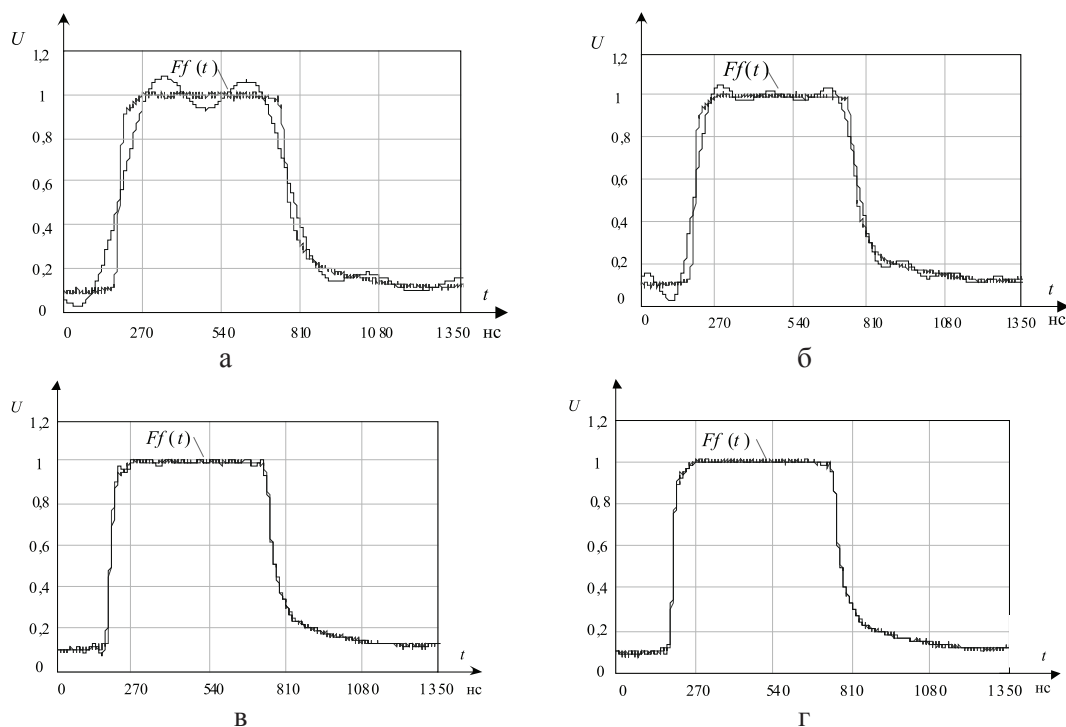


Рис. 3. Сравнение исходного и восстановленного сигналов при разном количестве гармоник с коммутатором типа газовый разрядник NENSHI-230-07 N: а – $N = 5$; б – $N = 10$; в – $N = 30$; г – $N = 50$ (N – количество гармоник, использованных при обратном преобразовании Фурье)

Амплитудно-частотные характеристики A для различных типов коммутаторов можно определить как удвоенный модуль дискретной функции Фурье (1) [1, 4]:

$$A_j = |F_j| \cdot 2, \quad (2)$$

где $j = 0 \dots 50$ – порядковый номер гармоники; $A_0 = \frac{A_0}{2}$ – амплитуда постоянной составляющей.

На рис. 4 в качестве примера приведены амплитудно-частотные спектры двух

коммутаторов: геркон вакуумный и газовый разрядник.

Фазочастотные характеристики φ для различных типов коммутаторов можно определить, используя функцию аргумента $\arg$ от дискретной функции Фурье (1):

$$\varphi_j = \frac{\arg(F_j)}{\deg}, \quad (3)$$

где $\deg$ – функция, позволяющая фазочастотные характеристики получать в градусах, а не в радианах.

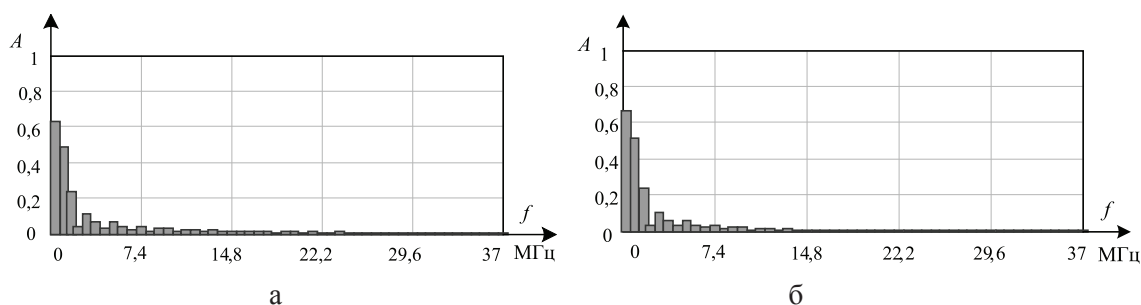


Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры коммутаторов типа: а – геркон вакуумный MKA-52141-GrA; б – газовый разрядник NENSHI 230-07

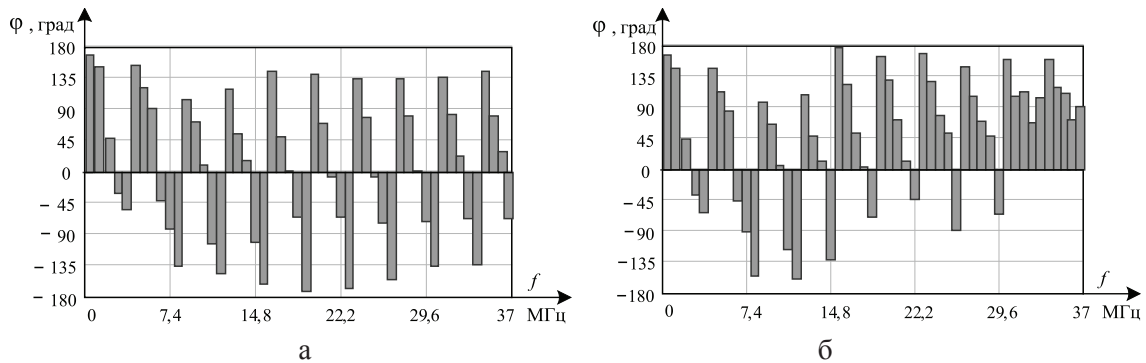


Рис. 5. Фазочастотные спектры φ коммутаторов типа:
а – геркон вакуумный МКА-52141-ГрА; б – газовый разрядник NENSHI 230-07

Визуально амплитудно-частотные характеристики мало отличаются друг от друга, хотя, если судить по форме фронта исходных импульсов, отличие должно быть. Поэтому нами предложено сравнивать между собой спектры фаз в виде относительно отклонения спектров фаз (4), а спектры амплитуд (5) в виде относительного отклонения вкладов энергий каждой гармоники импульсов в общую энергию спектра (6).

Относительное отклонение спектров фаз импульсов $\Delta\varphi_j$ в относительных единицах (о.е.):

$$\Delta\varphi_j = \frac{\varphi_j - \varphi_{1j}}{\varphi_j}, \quad (4)$$

где φ_j и φ_{1j} – спектры фаз коммутаторов двух типов соответственно.

Относительное отклонение спектров амплитуд импульсов ΔA_j в относительных единицах (о.е.):

$$\Delta A_j = \frac{A_j}{A_{1j}}, \quad (5)$$

где A_j и A_{1j} – спектры амплитуд коммутаторов двух типов соответственно.

Относительное отклонение вкладов энергий каждой гармоники импульсов в общую энергию спектра ΔW в относительных единицах (о.е.):

$$\Delta W = \frac{W}{W_1}, \quad (6)$$

$$\text{где } W = \frac{(|F_j| \cdot 2)^2}{\sum_{j=1}^{n-1} (|F_j| \cdot 2)^2 + \frac{(|F_0| \cdot 2)^2}{2}} \cdot 100 -$$

вклад каждой гармоники в общую энергию спектра коммутаторов различного типа;

$(|F_j| \cdot 2)^2$ – энергия отдельной гармони-

ки; $F_0 = \frac{F_0}{2}$ – коэффициенты ряда Фурье постоянной составляющей; $\frac{(|F_0| \cdot 2)^2}{2}$ –

энергия постоянной составляющей; $\sum_{j=1}^{n-1} (|F_j| \cdot 2)^2 + \frac{(|F_0| \cdot 2)^2}{2}$ – общая энергия спек-

тра; $W_1 = \frac{(|F_{1j}| \cdot 2)^2}{\sum_{j=1}^{n-1} (|F_{1j}| \cdot 2)^2 + \frac{(|F_{10}| \cdot 2)^2}{2}} \cdot 100 -$

вклад каждой гармоники в общую энергию спектра коммутатора типа газовый разрядник, $j = 0 \dots 50$ – порядковый номер гармоники, $n = 2^{10} = 1024$ – количество точек. Особенность дискретного преобразования Фурье заключается в том, что количество точек должно быть кратным двум.

На рис. 6 приведены результаты сравнения двух типов коммутаторов: геркона вакуумного и газового разрядника.

Аналогичные сравнения различных коммутаторов по данной методике были сделаны для всех приведенных выше коммутаторов. Оказалось, что лучшей наполняемостью высокочастотными составляющими обладает импульс, формируемый вакуумным герконом типа МКА-52141-ГрА. Остальные коммутаторы можно проранжировать по наполняемости высокочастотными гармониками. Результаты приведены в таблице ниже.

Результаты

Предложена методика, позволяющая производить сравнение импульсов при помощи разложения в ряд Фурье и сопоставления в относительных единицах спектров исходных импульсов, с помощью которой возможно определить из рассмотренных коммутаторов наиболее приемлемый коммутатор по наполняемости высокочастотными составляющими (геркон МКА-52141-ГрА).

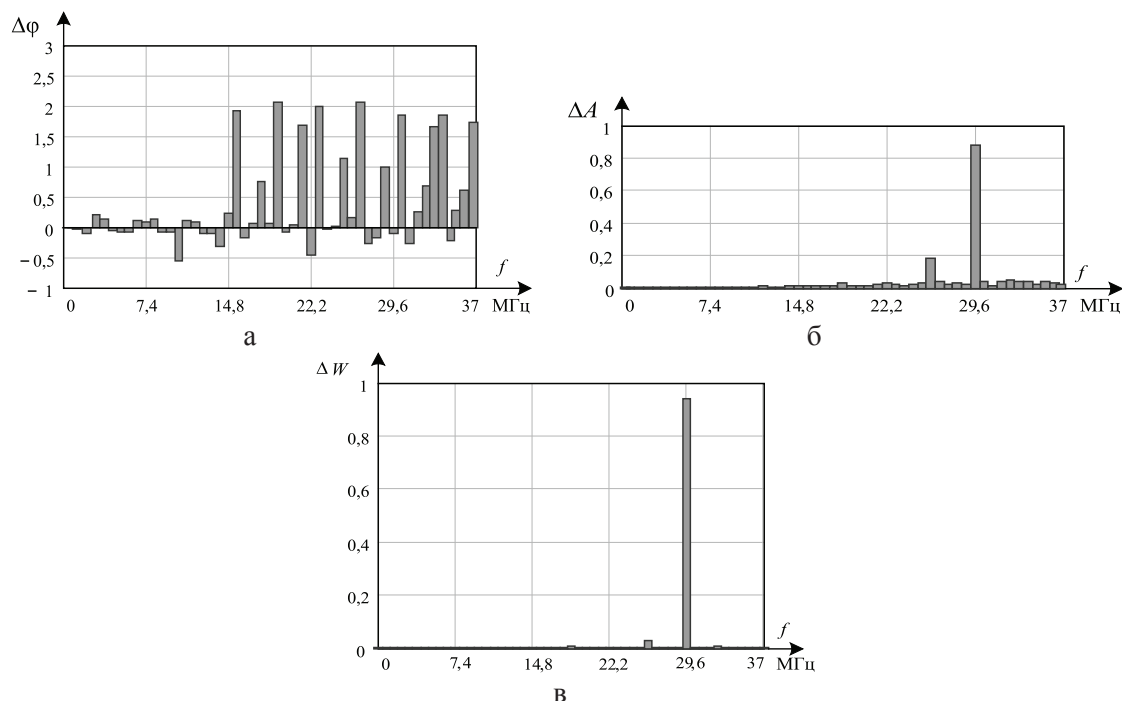


Рис. 6. Результаты сравнения коммутаторов типа геркон вакуумный и газовый разрядник: а – относительное отклонение спектров фаз $\Delta\varphi$; б – относительное отклонение спектров амплитуд ΔA ; в – относительное отклонение вкладов энергий каждой гармоники импульсов в общую энергию спектра ΔW

Сопоставление исследованных коммутаторов по наполняемости высокочастотными гармониками

Тип коммутатора	Условное место по наполняемости высокочастотными гармониками по сравнению с разрядником NENSHI 230-07
Геркон вакуумный МКА-52141-Гра	1
Геркон газовый типа КЭМ	2
Ртутное реле	3
Механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01	4
Кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb	5
Разрядник NENSHI 230-07	6

Список литературы

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
2. Введенский Ю.В. Тиратронный генератор наносекундных импульсов с универсальным выходом // Известия вузов СССР. Радиотехника. – 1959. – № 2. – С. 249–251.
3. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: справочник / А.Б. Гитцевич и др. / под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК-а, 1996. – 528 с.
4. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
5. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – Dec. 2012, Is. 13, Vol. 4, no. 4. – P. 149–153.
6. Lekh V., Tyminskiy L. New Method of Damage Detection at the Transformer Test for Electrodynamical Strength // Electrichestvo. – 1966. – № 1. – P. 19–23.

References

1. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. Chislennyye metody, M.: Nauka, 1987, 600 p.
2. Vvedenskiy Yu.V. Tiratronnyy generator nanosekundnykh impulsov s universalnym vykhodom, Izvestiya vuzov SSSR. Radiotekhnika, 1959, no. 2, pp. 249–251.

3. Gittsevich A.B. i dr. Poluprovodnikovyye pribory. Diody vpyryamitelnye, stabilitriony, tiristory: spravochnik, pod red. A.V. Golomedova, M.: KUBK-a, 1996, 528 p.
4. Demidovich B.P., Maron I.A. Osnovy vychislitelnoy matematiki, M.: Nauka, 1970, 664 p.
5. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method, International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, Dec. 2012, Is. 13, Vol. 4, no. 4, pp. 149–153.
6. Lekh V., Tyminskiy L. New Method of Damage Detection at the Transformer Test for Electrodynamical Strength, Electrichestvo, 1966, no. 1, pp. 19–23.

Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., заведующий кафедрой ЭПП ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Слободян С.М., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 11.07.2013.