

УДК 621.314.222.6:517.5

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОММУТАТОРА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА НИЗКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

А.В. Лавринович, О.В. Васильева*

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, г. Томск

*Томский политехнический университет

E-mail: vasileva.o.v@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью выбора наиболее оптимального коммутатора с точки зрения наполняемости высокочастотными составляющими.

Цель работы: разработка методики сравнения импульсов на выходе генератора наносекундных импульсов для определения наиболее оптимального коммутатора, для зондирования механического состояния обмоток силовых трансформаторов.

Методы исследования: для объективного сравнения получаемых импульсов между собой был применен метод быстрого дискретного Фурье-анализа в среде MathCAD. Обоснование метода заключается в том, что дискретное преобразование Фурье позволяет получить необходимые результаты быстро и с достаточной точностью

Результаты: выявлено оптимальное количество гармоник, на которое необходимо раскладывать исходный импульс. Выбран критерий, по которому можно судить, какой коммутатор наиболее приемлем для использования в генераторах для зондирования механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Предложена методика для анализа и сравнения между собой импульсов на выходе наносекундного генератора.

Ключевые слова:

Импульсный генератор, коммутатор, газовый разрядник, импульс, трансформатор, дискретное преобразование Фурье, энергия.

Известен метод диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов низковольтными импульсами микросекундной длительности, предложенный в 1966 г. [1]. Суть метода основана на сопоставлении импульса-отклика с одной из обмоток трансформатора при подаче зондирующего импульса на одну из других обмоток трансформатора. 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. Использование импульсов микросекундной длительности не обеспечивает чувствительности, необходимой для обнаружения мелких дефектов. Увеличить чувствительность данного метода можно, если подавать на обмотку трансформатора зондирующие импульсы с более коротким фронтом, чтобы получить отклик от высокочастотных контуров обмотки [2, 3]. 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 и повторяемость формы импульса. Для зондирования обмоток трансформаторов очень важно, чтобы формируемые импульсы повторялись от импульса к импульсу, так как от формы зондирующего импульса зависит форма импульса-отклика.

Генератор был собран по схеме Введенского [4], что позволяет независимо от значения сопротивле-

ния сосредоточенной нагрузки формировать на ней одиночный импульс.

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. Электронные ключи сразу же были исключены из этого списка, так как по каталожным данным не удалось найти электронного ключа, который бы обеспечивал фронт менее 50 нс при напряжении коммутации более 150 В [5, 6].

Методика исследования

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. Импульс напряжения на согласованной нагрузке на выходе генератора регистрировался осциллографом типа Tektronix-TDS2012 посредством стандартного прилагаемого к осциллографу пробника типа P2220, имеющего полосу пропускания порядка 200 МГц при измерении с коэффициентом ослабления регистрируемого сигнала 1:10.

Типичные импульсы, полученные в результате испытания разных коммутаторов, приведены на рис. 2, где U – напряжение в относительных единицах, t – время, нс.

Визуально импульсы отличаются в основном на фронте. Кроме этого, видно некоторое различие и в плоской части импульсов. Это обусловлено свойства-

ми применяемых коммутаторов, т. к. остальные параметры генератора, включая индуктивность присоединения коммутатора, оставались во всех экспериментах одинаковыми. Сопоставление импульсов только по длительности фронта не дает полного представления о «наполнении» импульса гармониками, что важно при зондировании обмоток трансформатора. Во-первых, измерение длительности фронта для сопоставления между собой импульсов может дать существенную погрешность, т. к. зависит от метода измерения и субъективных особенностей измеряющего. Во-вторых, сопоставление импульсов на плоской части, в общем, еще более затруднительно по указанным выше причинам.

Для объективного сравнения получаемых импульсов между собой нами был применен метод быстрого дискретного Фурье-анализа. Обоснова-

ние метода заключается в том, что дискретное преобразование Фурье позволяет получить необходимые результаты быстро и с достаточной точностью, что подтверждает рис. 3.

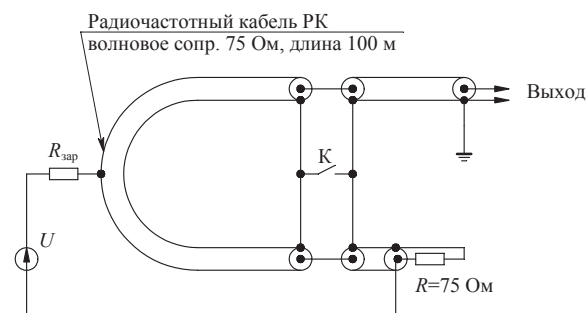


Рис. 1. Электрическая схема генератора: К – исследуемый коммутатор

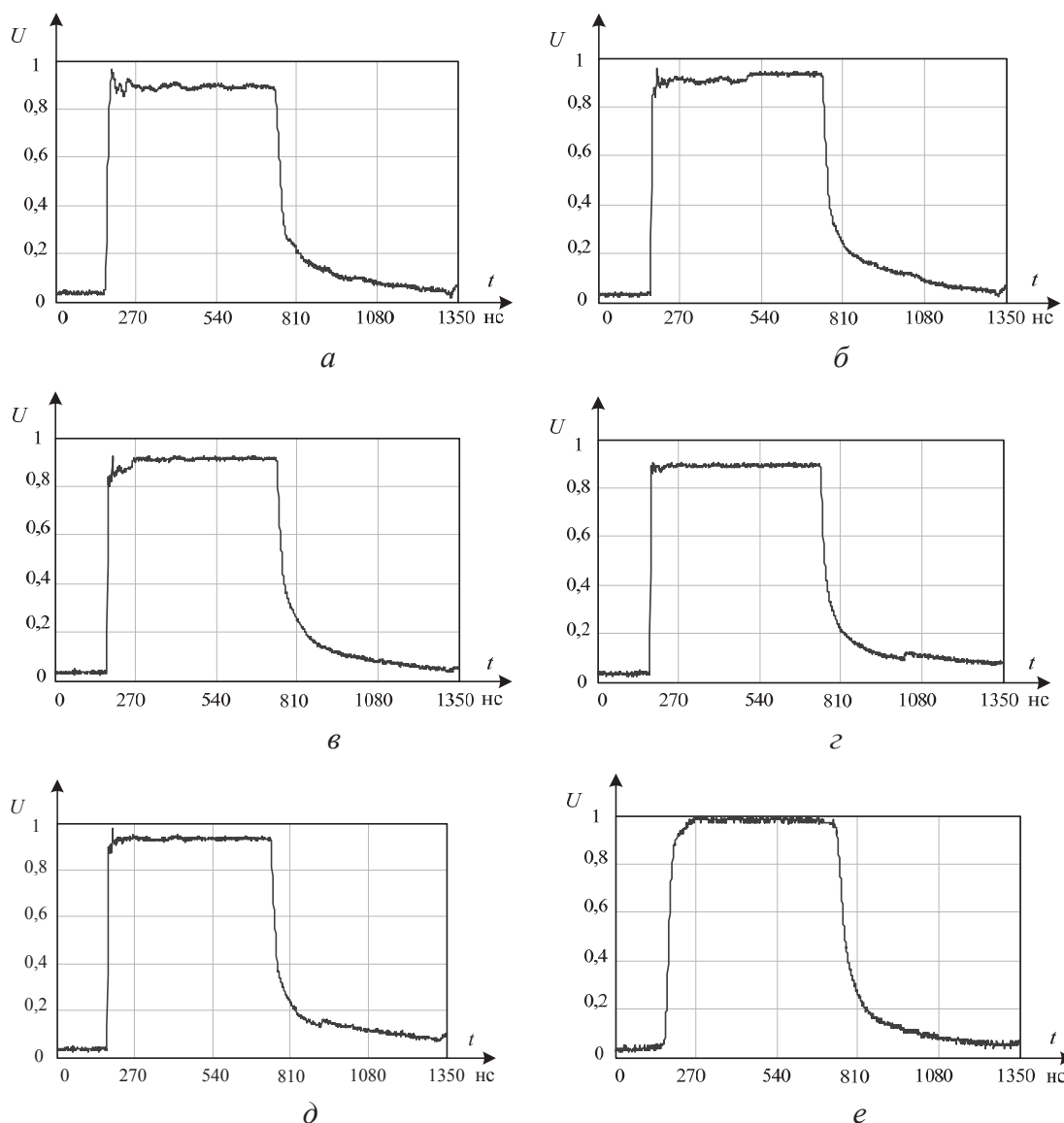


Рис. 2. Импульсы напряжения, зарегистрированные на согласованной нагрузке на выходе генератора: а) ртутное реле; б) механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01; в) кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb; г) геркон газовый типа КЭМ; д) геркон вакуумный МКА-52141-ГрА; е) газовый разрядник NENSHI 230-07

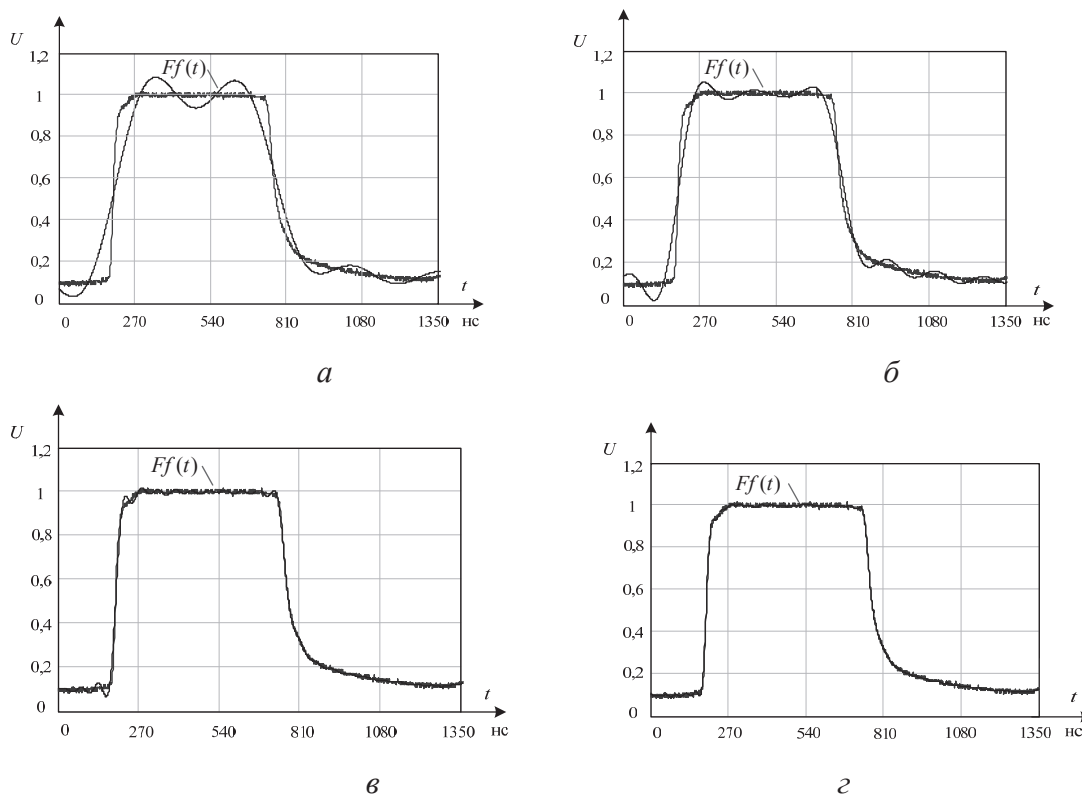


Рис. 3. Сравнение исходного и восстановленного сигналов при разном количестве гармоник с коммутатором типа газовый разрядник NENSHI-230-07 N: а) 5; б) 10; в) 30; г) 50 (N – количество гармоник, использованных при обратном преобразовании Фурье)

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. Амплитуда каждого импульса принималась равной 1 условной единице. Это позволяет сопоставлять между собой амплитудно-частотные характеристики разных коммутаторов независимо от амплитуды формируемого импульса.

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 на рис. 3 изображений восстановленных импульсов видно, что минимальное количество гармоник, на которое необходимо складывать исходный импульс, составляет 50. При меньшем количестве гармоник (рис. 3, в) наблюдается заметное несовпадение исходного и восстановленного импульсов.

Эффективность метода продемонстрирована на примере сопоставления амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик различных типов используемых коммутаторов (амплитудно-частотная характеристика в относительных единицах приведена на рис. 4, а фазочастотная характеристика – на рис. 5, где f – частота соответствующей гармоники, $f=0,74$ МГц – частота основной гармоники).

Амплитудно-частотные характеристики A для различных типов коммутаторов можно определить как удвоенный модуль дискретной функции Фурье (1) [7, 8]:

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

где $j=0-50$ – порядковый номер гармоники, $A_0=A_0/2$ – амплитуда постоянной составляющей.

Для остальных типов исследованных коммутаторов визуально амплитудно-частотные характеристики мало отличались друг от друга.

Фазочастотные характеристики φ для различных типов коммутаторов можно определить, ис-

пользуя 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.

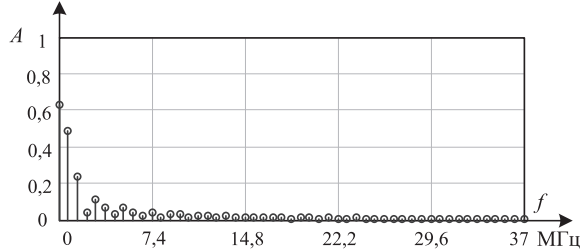


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр A коммутатора типа геркон вакуумный МКА-52141-Гра

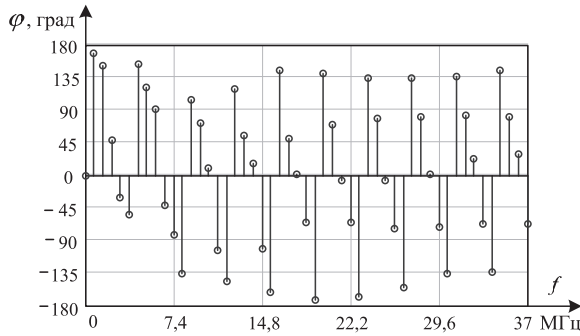


Рис. 5. Фазочастотный спектр φ коммутатора типа ртутное реле геркон вакуумный МКА-52141-Гра

Для остальных типов коммутаторов фазочастотные характеристики также визуально не отличаются друг от друга.

Поэтому нами предложено сравнивать между собой спектры фаз и спектры амплитуд импульсов в виде относительного отклонения спектров фаз (4) и спектров амплитуд (5), а так же спектры амплитуд сравнивать в виде спектральной плотности мощности, т. е. относительного отклонения вкладов энергий каждой гармоники импульсов в общую энергию спектра (6), как представлено на рис. 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 (3).

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 (2).

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

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

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 гармоники; $F_0 = \frac{F_0}{2}$ – коэффициенты ряда Фурье по-

стоянной составляющей; $\frac{(|F_0| \cdot 2)^2}{2}$ – энергия постоян-

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

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

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

Критерии выбора

Основным критерием, по которому можно судить, какой коммутатор наиболее приемлем для использования в генераторах для зондирования механического состояния обмоток силовых трансформаторов, является степень наполняемости высокочастотными составляющими.

На рис. 6 приведены результаты сравнения двух типов коммутаторов: ртутное реле и газовый разрядник.

Таблица. 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

Аналогичные сравнения различных коммутаторов по данной методике были сделаны для всех

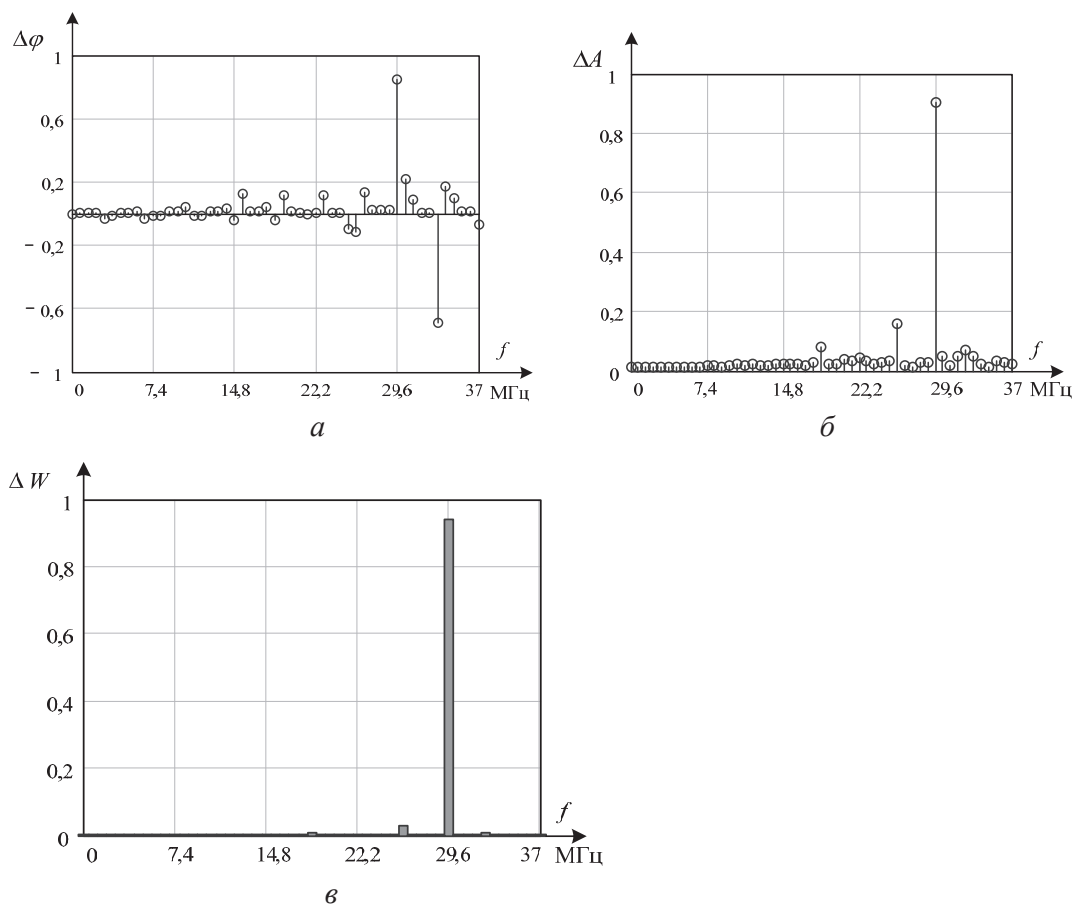


Рис. 6. Результаты сравнения относительного отклонения коммутаторов типа ртутное реле и газовый разрядник: а) спектров фаз $\Delta\varphi$; б) спектров амплитуд ΔA ; в) вкладов энергий каждой гармоники импульсов в общую энергию спектра ΔW

приведенных выше коммутаторов (4–6). 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.

Выводы

Предложена методика для анализа и сравнения между собой импульсов на выходе наносекундного

генератора. Сравнение по предложенной методике выходных импульсов, получаемых использованием различных коммутаторов (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), позволяет выбрать наиболее оптимальный с точки зрения наполняемости высокочастотными составляющими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lech W., Tyminski L. Detecting transformer winding damage by the Low Voltage Impulse method // *Electrical Review (ERA Translation)*. – 1966. – V. 179. – № 21. – P. 19–23
2. 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*. – 2012. – Iss. 13. – V. 4. – № 4. – P. 149–153.
3. Лавринович В.А., Пичугина М.Т., Рамазанова А.Р. Применение наносекундных низковольтных импульсов для диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2011. – № 2. – С. 292–294.
4. Введенский Ю.В. Тиратронный генератор наносекундных импульсов с универсальным выходом // *Известия вузов СССР. Радиотехника*. – 1959. – № 2. – С. 249–251.
5. Галкин В.И., Булычев А.Л., Лямин П.М. Полупроводниковые приборы. Транзисторы широкого применения: справочник. – Минск: Беларусь, 1995. – 383 с.
6. Гитцевич А.Б. и др. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: справочник / под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК-а, 1996. – 528 с.
7. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.

Поступила 27.05.2013 г.

UDC 621.314.222.6:517.5

THE TECHNIQUE FOR SELECTING A SWITCH FOR LOW-VOLTAGE NANOSECOND PULSES GENERATOR

A.V. Lavrinovich, O.V. Vasilyeva*

Institute of High Current Electronics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk
Tomsk Polytechnic University

The urgency of the discussed issue is caused by the necessity of selecting the most optimal switch from the point of view of the fullness of the high-frequency components.

The main aim of the study: to develop the technique for comparing pulses at the output of nanosecond pulses generator to determine the most appropriate switch for sensing the mechanical condition of windings of power transformers.

The methods used in the study: for objective comparison of the obtained pulses the authors applied the method of fast discrete Fourier analysis in MathCAD. Method validation consists in the fact that the discrete Fourier transform allows obtaining the necessary results quickly and accurately.

The results: the authors found the optimum number of harmonics for initial pulse to be laid out. The authors selected the criterion by which one can judge what switch is the most appropriate to be used in generators for sensing the mechanical condition of power transformer windings. The paper introduces the technique for analyzing and comparing nanosecond pulses at the generator output.

Key words:

Pulse generator, switchboard, gas discharge switch, impulse, transformer, Fourier's discrete transformation, energy.

REFERENCES

1. Lech W., Tyminski L. Detecting transformer winding damage by the Low Voltage Impulse method. *Electrical Review (ERA Translation)*, 1966. 179, 21, pp. 19–23.
2. 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*, 2012. 13, 4, pp. 149–153.
3. Lavrinovich V.A., Pichugina M.T., Ramazanova A.R. *Nauchnye problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2011. 2, pp. 292–294.
4. Vvedenskiy Yu.V. *Izvestiya vuzov SSSR. Radiotekhnika*, 1959. 2, pp. 249–251.
5. Galkin V.I., Bulychev A.L., Lyamin P.M. *Poluprovodnikovye pribory. Tranzistory shirokogo primeneniya* (Semiconductor devices. Transistors wide application). Minsk, Belarus Publ., 1995. 383 p.
6. Gittsevich A.B. *Poluprovodnikovye pribory. Diody vypryamitelnye, stabiliziruyemye, tiristory* (Semiconductor devices. Rectifier diodes, Zener diodes, thyristors). Moscow, KUBK-a Publ., 1996. 528 p.
7. Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitelnoy matematiki* (Foundations of computational mathematics). Moscow, Nauka Publ., 1970. 664 p.
8. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow, Nauka Publ., 1987. 600 p.