

**А.В. БОРЦОВ**

### ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЕРКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Создан и экспериментально исследован генератор импульсов напряжения для проверки высоковольтных делителей напряжения. В генераторе в качестве ключевого элемента использован высоковольтный быстродействующий *MOSFET* – транзистор. Для устранения эффекта Миллера нагрузка генератора включена в исток *MOSFET* – транзистора. Нагрузка согласована с выходом генератора. Генератор подключается к объекту испытаний с помощью экранированной витой пары длиной 0,5 метра. Влияние емкости нагрузки и экранированной витой пары компенсируется *RL* – цепью, включенной на выходе генератора. Такое включение нагрузки позволило получить время нарастания импульса напряжения равным времени коммутации *MOSFET* – транзистора. Генератор имеет следующие амплитудно-временные характеристики: форма импульса напряжения – прямоугольная, амплитуда импульса напряжения – 350 В, длительность фронта импульса напряжения не более 25 нс, выброс на фронте импульса напряжения не превышает 3 %, длительность спада импульса напряжения не более 40 нс. Длительность импульса напряжения плавно регулируется от 2 мкс до 65 мкс. Генератор импульсных напряжений использован при метрологической поверке на низком напряжении устройства для измерения импульсов высокого напряжения УИВН-ОДН-1,2 (г. Артемовск) в 2016г. Экспериментальные исследования показали хорошее совпадение метрологических характеристик УИВН-ОДН-1,2 на низком и на высоком напряжении. Следовательно, с помощью генератора можно поверять на низком напряжении высоковольтные делители напряжения с коэффициентом деления до 50000. Генератор прост в изготовлении и не требует сложной настройки.

**Ключевые слова:** высоковольтный делитель напряжения, генератор импульсов напряжения, *MOSFET* – транзистор, эффект Миллера, коэффициент деления, форма импульса напряжения, амплитуда импульса напряжения, фронт импульса напряжения, спад импульса напряжения

**О.В. БОРЦОВ**

### ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ ДЛЯ ПОВІРКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ДІЛЬНИКІВ НАПРУГИ

Створено й експериментально досліджено генератор імпульсів напруги для повірки високовольтних дільників напруги. У генераторі як ключовий елемент використано високовольтний швидкодіючий *MOSFET* – транзистор. Для усунення ефекту Міллера навантаження включено в витік *MOSFET* – транзистора. Навантаження узгоджено з виходом генератора. Генератор підключається до об'єкта випробувань за допомогою екранованої крученої пари довжиною 0,5 метра. Вплив ємності навантаження та екранованої крученої пари компенсується *RL* – ланцюгом, включеним на виході генератора. Таке включення навантаження дозволило отримати час наростання імпульсу напруги рівним часу комутації *MOSFET* – транзистора. Генератор має наступні амплітудно-тимчасові характеристики: форма імпульсу напруги – прямокутна, амплітуда імпульсу напруги – 350 В, тривалість фронту імпульсу напруги не більше 25 нс, викид на фронті імпульсу напруги не перевищує 3%, тривалість спаду імпульсу напруги не більше 40 нс. Тривалість імпульсу напруги плавно регулюється від 2 мкс до 65 мкс. Генератор імпульсних напруг використано при метрологічній повірці на низькій напрузі пристрою для вимірювання імпульсів високої напруги УИВН-ОДН-1,2 (м Артемівськ) в 2016р. Експериментальні дослідження показали хороший збіг метрологічних характеристик УИВН-ОДН-1,2 на низькій і на високій напрузі. Таким чином, за допомогою генератора можна повірять на низькій напрузі високовольтні дільники напруги з коефіцієнтом ділення до 50000. Генератор простий у виготовленні і не вимагає складного налагодження.

**Ключові слова:** високовольтний дільник напруги, генератор імпульсів напруги, *MOSFET* – транзистор, ефект Міллера, коефіцієнт ділення, форма імпульсу напруги, амплітуда імпульсу напруги, фронт імпульсу напруги, спад імпульсу напруги

**A. V. BORTSOV**

### PULSED VOLTAGE GENERATOR FOR VERIFICATION HIGH VOLTAGE DIVIDERS

The voltage pulse generator for testing high-voltage dividers has been created and experimentally investigated. The generator uses a high-voltage high-speed MOSFET – transistor as a key element. To eliminate the Miller effect, the load is included in the source of the MOSFET – transistor. The load is matched with the generator output. The generator is connected to the test object using a 0.5 meter shielded twisted pair cable. The influence of the load capacitance and shielded twisted pair is compensated by the *RL* – circuit connected to the generator output. Such switching on the load made it possible to obtain the rise time of the voltage pulse equal to the switching time of the MOSFET – transistor. The generator has the following amplitude-time characteristics: the shape of the pulse is rectangular, the amplitude of the voltage pulse is 350 V, voltage pulse front duration is not more than 25 ns, surge at the front of a voltage pulse does not exceed 3 %, and voltage drop is not more than 40 ns. The duration of the voltage pulse is continuously adjustable from 2 μs to 65 μs. The pulse voltage generator was used during metrological verification at low voltage of the device for measuring high voltage pulses UIVN-ODN-1.2 (Artyomovsk) in 2016. Experimental investigations have shown good agreement between the metrological characteristics of UIVN-ODN-1.2 at low and high voltage. Therefore, with the help of a generator, it is possible to verify high voltage dividers with a division ratio of up to 50,000 at low voltage. The generator is simple to manufacture and does not require complex settings.

**Keywords:** high-voltage divider, a pulse generator, MOSFET – transistor, Miller effect, division factor, voltage pulse shape, voltage pulse amplitude, voltage pulse front, voltage pulse decline

**Введение.** Обычно устройство для измерения импульсных высоких напряжений состоит из высоковольтного делителя напряжения (ВДН), измерительного кабеля и осциллографа. Так как эталонные источники импульсных напряжений мегавольтного диапазона для калибровки высоковольтных делителей напряжения отсутствуют, экспериментальное опреде-

ление погрешности измерений представляет собой сложную задачу [1, 2]. При этом основное требование к ВДН – передача с заданной погрешностью формы измеряемого импульса и его амплитудно-временных характеристик: амплитуды, фронта и длительности импульса. Коэффициент деления ВДН  $K_d$ , определяемый как отношение измеряемого напряжения к

напряжению на выходе ВДН, может составлять десятки тысяч. Использование при создании ВДН высоковольтных генераторов импульсных напряжений (ГИН), например, ГИН Аркадьева-Маркса или ГИН с использованием *SOS* – эффекта, не представляется целесообразным в виду их сложности и высокой стоимости [3].

Для экспериментальной поверки ВДН естественно использовать низковольтные (амплитуда импульсов  $U_m \leq 500$  В) генераторы импульсных напряжений. Современные цифровые осциллографы позволяют измерять с погрешностью не более 5% импульсы напряжения амплитудой  $U_{\text{мвх}} \geq 5$  мВ [4]. Следовательно, коэффициент деления  $K_d = U_m / U_{\text{мвх}} = 100 U_m$  (В). Применение стандартных генераторов с  $U_m \leq 50$  В ограничивает коэффициент деления в диапазоне  $K_d \leq 5000$ .

**Цель работы** – разработка, изготовление и экспериментальные исследования генератора импульсных напряжений, позволяющего поверять ВДН с коэффициентом деления  $K_d \leq 50000$ .

**Принцип действия и описание генератора.** Генератор реализован по блок-схеме, представленной на рис. 1.

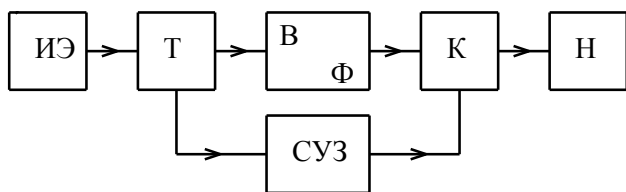


Рис. 1. Блок-схема генератора импульсных напряжений: ИЭ – источник энергии; Т – сетевой трансформатор; В – выпрямитель; Ф – фильтр; СУЗ – система управления и защиты; К – коммутатор; Н – нагрузка

В качестве источника энергии (ИЭ) использована однофазная сеть 220 В, 50 Гц. Сетевой трансформатор (Т) служит для питания системы управления и защиты (СУЗ) и “гальванической развязки” генератора от источника энергии. С выхода блока выпрямителя (В) – фильтр (Ф) постоянное напряжение +350 В коммутатором (К) подается на нагрузку (Н). Режим работы коммутатора задается системой управления и защиты.

Электрическая схема генератора импульсных напряжений представлена на рис. 2.

Трансформатор *TR1* содержит две вторичных обмотки – первая, с коэффициентом трансформации  $K_T$  близким к 1, служит для создания рабочего напряжения генератора  $U = 350$  В (*VD1*, *C1*, *C2*). Ко второй обмотке подключен стабилизатор напряжения +15 В (*VD2*, *C3*, *C4*, *DA1*, *L1*, *C5*, *C9*) для питания системы управления и защиты.

Генератор управляющих импульсов (*DD1.1*, *DD1.2*, *C6*, *VD3*, *VD4*, *R1*, *R2*, *RP1*) [5] позволяет регулировать длительность в диапазоне от 2 мкс до 65 мкс. Согласование генератора с коммутатором *VT1* осуществляется драйвером верхнего ключа *IR2117* (*DD2*, *VD5*, *C7*, *C8*).

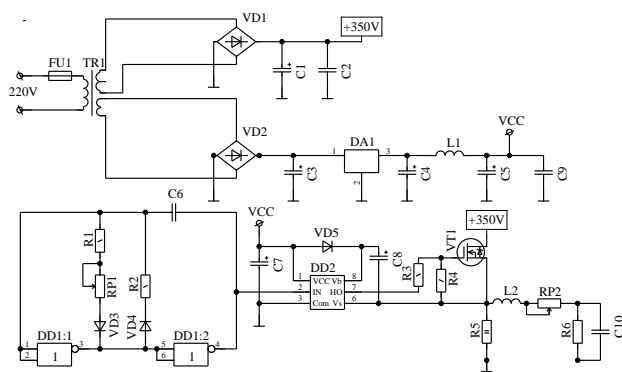


Рис. 2. Электрическая схема генератора импульсных напряжений

В качестве нагрузки использован малоиндуктивный резистор *R5* сопротивлением 50 Ом. Импульс напряжения с нагрузки снимается экранированной витой парой длиной 0,5 метра (волновое сопротивление около 50 Ом) [5].

Входное сопротивление *R6* и входная емкость *C10* осциллографа “заваливают” фронт импульса. Для коррекции фронта импульса использована цепь *RP2*, *L2*.

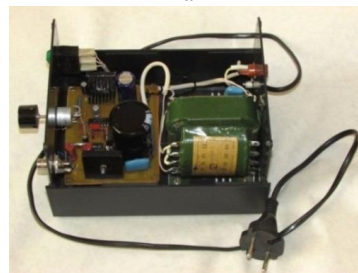
В качестве коммутатора выбран высоковольтный быстродействующий *MOSFET* – транзистор *IRF840* с параметрами: максимальное рабочее напряжение – 500 В, время коммутации – 20 нс [6].

Известно, что для быстродействующих ключей характерен эффект Миллера – сильное влияние “проходной” емкости затвор-сток *MOSFET* – транзистора на форму импульса [7]. Для подавления эффекта Миллера нагрузка включена в цепь затвор-исток *MOSFET* – транзистора [5]. Такое включение нагрузки позволило получить время нарастания импульса, мало отличающееся от времени коммутации *MOSFET* – транзистора.

Внешний вид генератора импульсных напряжений показан на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Внешний вид генератора: а – с верхней крышкой; б – со снятой верхней крышкой

**Результаты измерений.** Измерения при настройке генератора проводились осциллографом RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц и погрешностью измерения не превышающей 5 % [4].

Из осциллограмм (рис. 4) видно, что амплитуда импульса напряжения – 350 В и время нарастания импульса на уровне 0,1-0,9 не превышает 20 нс, что соответствует длительности фронта не более 25 нс.

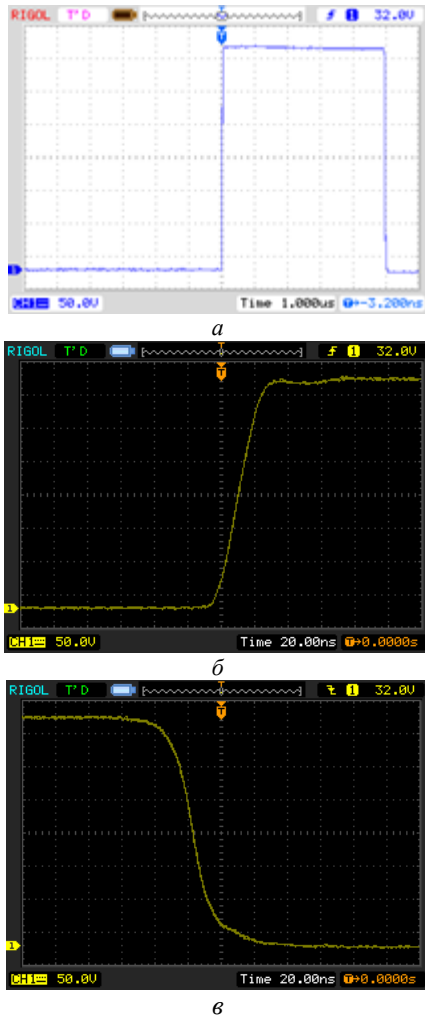


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения: *a* – полный импульс; *b* – фронт импульса; *v* – спад импульса

**Выводы.** 1. Разработан и изготовлен генератор импульсов напряжения с амплитудой 350 В и длительностью фронта не превышающей 25 нс. Данные амплитудно-временные параметры позволяют поверять высоковольтные делители напряжения с коэффициентом деления до 50000.

2. Генератор успешно апробирован при проверке высоковольтных омических делителей напряжения.

#### Список литературы

1. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. М.: Энергия. 1980. 136 с.
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. (Измерительные приборы и способы измерения). Пер. с нем. М.: Энергия. 1973. 232 с.
3. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике. Новосибирск: Наука. 1987. 226 с.
4. <http://www.rigol.com>
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир. 1983. – Т. 1. 598 с.
6. <http://www.irf.com>
7. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс. 2005. 416 с.

#### References (transliterated)

1. Kuzhekin I.P. Ispytatel'nyye ustanovki i izmereniya na vysokom napryazhenii. Moscow: Energiya. 1980. 136 p.
2. Shvab A. Izmereniya na vysokom napryazhenii. (Izmeritel'nyye pribory i sposoby izmereniya). Per. s nem. Moscow: Energiya. 1973. 232 p.
3. Kremnev V.V., Mesyats G.A. Metody umnozheniya i transformatsii impul'sov v sil'notochnoy elektronike. Novosibirsk: Nauka. 1987. 226 p.
4. <http://www.rigol.com>
5. Khorovits P., Khill U. Iskusstvo skhemotekhniki: V 2-kh tomakh. Per. s angl. Moscow: Mir. 1983. – T.1. 598 p.
6. <http://www.irf.com>
7. Semenov B.YU. Silovaya elektronika ot prostogo k slozhnomu. Moscow: SOLON-Press. 2005. 416 p.

Поступила (received) 24.02.20

#### Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

**Борцов Александр Васильевич (Борцов Александр Васильевич, Bortsov Alexander Vasilievich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; email: avbortsov@gmail.com.