

Имитатор импульсных высоковольтных перенапряжений

ВОЛЬСКИЙ С.И.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

КОРНЕВ А.С.

СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия

СКОРОХОД Ю.Ю.

ООО «Трансконвертер», Москва, Россия

ВИКУЛОВ И.П.

ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Предложена электрическая схема имитатора импульсных высоковольтных перенапряжений с амплитудой до 10 кВ постоянного тока, который предназначен для проверки устойчивости статических преобразователей к аварийным режимам согласно п. 4.9.3.5 ГОСТ33726-2016. Разработанный имитатор позволяет формировать импульс высоковольтного напряжения с требуемыми значениями по амплитуде, длительности и скорости нарастания и спада. Выведены аналитические выражения, которые достаточно точно описывают переходные процессы в электрических цепях предложенной схемы имитатора, что подтверждено компьютерным моделированием в среде MATLAB Simulink. С использованием полученных теоретических результатов разработан макетный образец имитатора для проведения проверки устойчивости силового высоковольтного преобразователя на воздействия заданного по форме и амплитуде перенапряжения. Приведены результаты практического использования разработанного имитатора на примере испытания, проведенного на преобразователе собственных нужд ПСН110 У1. Статья представляет интерес для специалистов – проектировщиков испытательного оборудования в части воздействия перенапряжений на статические высоковольтные преобразователи как для железнодорожного транспорта, так и для промышленного применения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитатор импульсного перенапряжения, силовой высоковольтный преобразователь, аварийный режим, постоянный ток

Имитатор импульсного перенапряжения (ИП) – это устройство, которое формирует выходное напряжение заданной формы, длительности и амплитуды. ИП предназначен для проверки устойчивости различных электронных устройств в части воздействия перенапряжения в цепи электропитания.

Существует большое количество разнообразных схем ИП. В обобщенном виде ИП содержит накопитель электрической энергии и управляемый коммутатор [1–3]. В качестве накопителя в ИП обычно применяют конденсаторы или реакторы. При этом используют контактный управляемый коммутатор на базе реле или контактора либо бесконтактный управляемый коммутатор на базе полупроводниковых ключей (тиристоров, симисторов, транзисторов и т. п.).

Следует отметить, что для допуска к применению любого статического преобразователя на железнодорожном транспорте необходимо получить сертификат на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС001/2011 [4]. Одним из таких требований является проверка на устойчивость

статического преобразователя постоянного тока к аварийным режимам согласно п. 4.9.3.5 ГОСТ33726 [5]. В данном пункте указано, что не допускается отказ элементов преобразователя при возникновении во входной цепи постоянного тока импульсов перенапряжения с параметрами, приведенными в табл. 1, где $U_{амп}$ – амплитуда выходного импульса напряжения ИП; $U_{ном}$ – номинальное значение входного напряжения статического преобразователя.

Как видно из табл. 1, к тестовому импульсу перенапряжения кроме требуемого значения по амплитуде предъявляют также требования как по форме нарастания, так и спада текущего значения. В связи с этим был разработан ИП, в котором за счет двух бесконтактных коммутаторов, выполненных на IGBT-приборах, осуществляется независимое формирование длительности нарастания и спада выходного импульсного напряжения.

Известно, что к ИП предъявляют следующие требования:

устройство должно обладать как можно меньшим выходным сопротивлением, чтобы нагрузка, которой

Таблица 1

Параметры импульсов напряжения постоянного тока
Parameters of DC voltage pulses

Наименование параметра	Требуемое значение
Время нарастания напряжения от нуля до амплитудного значения $U_{амп}$, мкс	250±50
Время снижения напряжения до половины амплитудного значения $U_{амп}$, мкс	2500±750
Амплитуда импульса: для номинального входного напряжения от 20 до 1000, В для номинального входного напряжения от 1000 до 3000, В	$5 U_{ном}$ $2500 \pm 2,5 U_{ном}$
Допустимое отклонение амплитуды импульса напряжения, %	±3

является статический преобразователь, не оказывала заметного шунтирующего воздействия на импульс перенапряжения;

конструкция устройства должна быть удобна для транспортирования и иметь сравнительно небольшие массу и габариты;

устройство должно иметь относительно небольшое пиковое потребление электрической энергии.

Анализ показывает, что указанные требования противоречат друг другу. При выполнении первого и третьего требований необходимо использовать накопительные конденсаторы большой емкости и реакторы значительной индуктивности, которые существенно повышают массу и габариты ИП. Особенно это заметно при разработке ИП для преобразователей с выходной мощностью более 100 кВ·А [6, 7]. С другой стороны, выполнение второго требования за счет снижения емкости накопительных конденсаторов и с учетом реализации первого требования потребует повышения пикового потребления электрической энергии.

В связи с этим в разработанном ИП за счет учета

конкретных входных параметров испытуемого статического преобразователя достигается компромисс между требуемым значением выходного сопротивления, минимизацией пикового потребления электрической энергии и приемлемыми массогабаритными показателями устройства.

Силовая схема разработанного ИП. В основу предложенной силовой схемы ИП заложен принцип отдельного формирования нарастания и спада выходного импульсного напряжения посредством управления двумя независимыми IGBT-приборами при учете конкретных входных параметров испытуемого статического преобразователя. При этом заданный уровень амплитудного значения $U_{амп}$ импульсного напряжения достигается с помощью повышающего трансформатора, установленного на выходе ИП.

Разработанная силовая схема ИП (рис. 1) имеет два режима работы. В первом режиме осуществляется накопление электрической энергии в конденсаторах $C2 \dots C7$. Во втором режиме работы происходит формирование требуемого выходного импульса перенапряжения. При

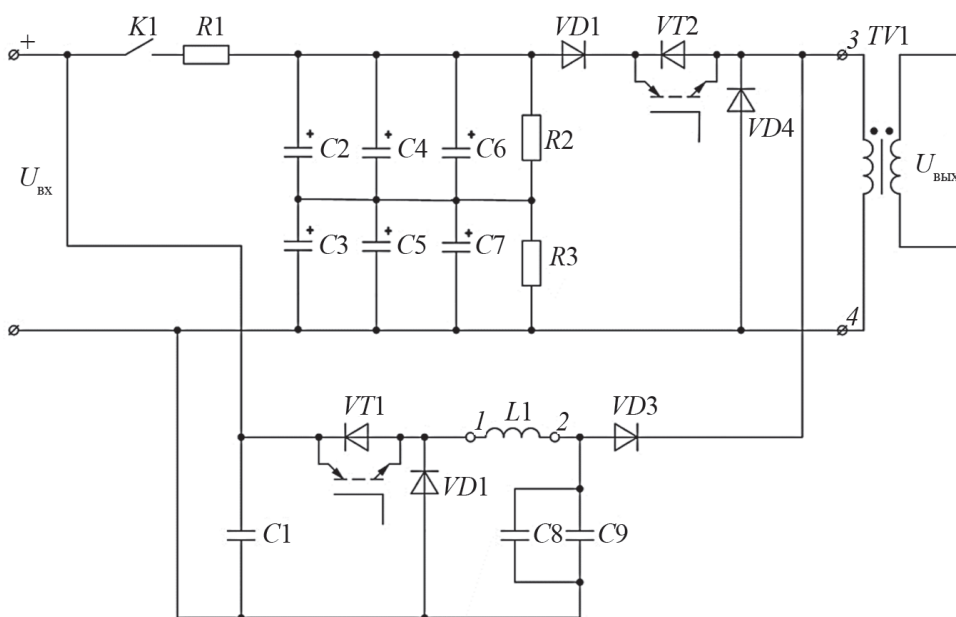


Рис. 1. Предложенная силовая схема ИП

Fig. 1. The proposed power scheme of the Pulse Overvoltage Simulator

этом требуемый фронт нарастания импульсного напряжения создают реактор $L1$ и конденсаторы $C8, C9$ после включения транзистора $VT1$, а кривую спада – конденсаторы $C2...C7$ после включения транзистора $VT2$.

Предложенная силовая схема ИП работает следующим образом.

В первом режиме работы ИП транзисторы $VT1$ и $VT2$ находятся в выключенном состоянии. После срабатывания входного контактора $K1$ происходит плавный заряд накопительных конденсаторов $C2...C7$ через токоограничивающий резистор $R1$ по цепи:

$$\text{“+” } U_{\text{вх}} - \text{ замкнутый } K1 - R1 - C2...C7 - \text{“–” } U_{\text{вх}}.$$

В результате конденсаторы $C2...C7$ заряжаются до входного напряжения ИП и силовая схема готова к переходу во второй режим работы. При этом пиковое значение тока, потребляемое устройством, определяется допустимым временем функционирования ИП в первом режиме работы. Чем больше возможная длительность первого режима работы, тем большее значение может иметь сопротивление $R1$ и тем меньшее пиковое значение будет иметь ток потребления ИП.

В начале второго режима работы на транзистор $VT1$ подаются сигнал управления, под воздействием которого он переходит в состояние высокой проводимости. Конденсаторы $C8$ и $C9$ начинают заряжаться от входного напряжения через замкнутый транзистор $VT1$ и реактор $L1$. Одновременно через диод $VD3$ напряжение от конденсаторов $C8$ и $C9$ поступает на первичную обмотку w_1 выходного трансформатора $TV1$. При этом на вторичной обмотке w_2 формируется выходное импульсное напряжение ИП требуемой амплитуды.

Таким образом, при включенном транзисторе $VT1$ синтезируется требуемый фронт нарастания выходного импульсного напряжения ИП, длительность которого определяется индуктивностью реактора $L1$, суммарной емкостью конденсаторов $C8$ и $C9$, коэффициентом трансформации выходного трансформатора $TV1$, а также входными параметрами самого испытуемого статического преобразователя.

Затем через заданный интервал времени нарастания выходного напряжения снимают сигнал управления с транзистора $VT1$ и подают сигнал управления на транзистор $VT2$, что обуславливает запирающее действие $VT1$ и отпирающее действие $VT2$. При этом напряжение конденсаторов $C2...C7$ через диод $VD2$ и открытый транзистор $VT2$ прикладывается к первичной обмотке w_1 выходного трансформатора $TV1$, на вторичной обмотке w_2 которого формируется выходное импульсное напряжение ИП. В результате конденсаторы $C2...C7$ начинают разряжаться через выходной трансформатор на входные цепи испытуемого статического преобразователя.

Таким образом, при открытом состоянии транзистора $VT2$ синтезируется требуемый спад выходного импульсного напряжения ИП, длительность которого определяется суммарной емкостью конденсаторов

$C2...C7$, коэффициентом трансформации выходного трансформатора $TV1$ и входными параметрами испытуемого статического преобразователя.

Через заданное время спада выходного напряжения снимают сигнал управления с транзистора $VT2$ и устройство переходит в первый режим работы. При этом диод $VD1$ обеспечивает цепь протекания тока силового реактора $L1$ при запертом транзисторе $VT1$, а диод $VD4$ обеспечивает протекание тока первичной обмотки w_1 при запертом $VT2$.

После размыкания входного контактора $K1$ резисторы $R2$ и $R3$ осуществляют гарантированный разряд накопительных конденсаторов $C2...C7$ до безопасного для жизни человека напряжения. В свою очередь разряд конденсаторов $C8$ и $C9$ происходит через первичную обмотку трансформатора $TV1$.

Математическое описание переходных процессов в разработанном ИП. Ранее было отмечено, что разработанная силовая схема ИП предназначена для проверки статических преобразователей мощностью выше 100 кВ·А. С учетом большой выходной мощности испытуемого преобразователя был выбран подход, при котором существенное снижение пикового потребления электрической энергии, а также уменьшение массы и габаритов достигаются за счет повышения выходного сопротивления устройства. Однако при таком подходе входные параметры испытуемого статического преобразователя оказывают существенное влияние на форму выходного импульсного напряжения. Данный фактор обуславливает необходимость подбора параметров реактивных элементов ИП для каждого типа испытуемого статического преобразователя.

В свою очередь это определяет необходимость в разработке математического описания предложенной силовой схемы ИП, позволяющего вычислять параметры реактивных элементов устройства. К таким элементам ИП относятся конденсаторы $C8$ и $C9$, силовой реактор $L1$ и накопительные конденсаторы $C2...C7$. С целью упрощения изменения параметров реактивных элементов на реальном ИП было принято решение об использовании силового реактора $L1$ с постоянным значением индуктивности, а конденсаторы $C2...C9$ применять с переменными значениями емкости.

Следует заметить, что проверку устойчивости на воздействие импульсного перенапряжения проводят на работающем статическом преобразователе, к которому подведено высоковольтное входное напряжение $U_{\text{ном}}$. В связи с этим разработанный ИП подключают последовательно с источником входного напряжения статического преобразователя, соответственно амплитуда его выходного импульсного напряжения вычисляется как

$$U_{\text{амп}} = U_{\text{амп}} - U_{\text{ном}}, \quad (1)$$

На рис. 2 представлена обобщенная схема разработанной силовой цепи ИП, которая приведена к вторичной стороне выходного трансформатора $TV1$.

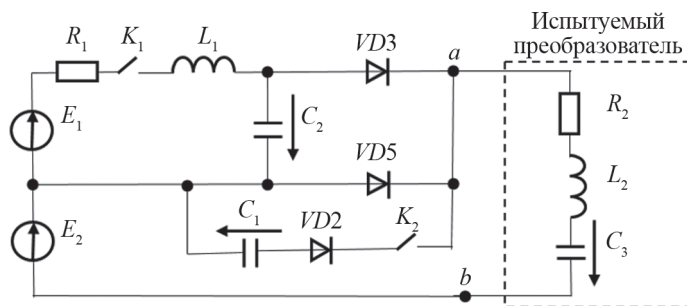


Рис. 2. Обобщенная схема разработанной силовой цепи ИП, приведенная к вторичной стороне выходного трансформатора $TV1$: $E_1 = U_{амп} = 7000$ В – ЭДС источника входного напряжения ИП; $E_2 = U_{ном} = 3000$ В – ЭДС источника питания статического преобразователя; $R_1 = 3$ Ом и $L_1 = 27$ мГн – сопротивление и индуктивность силового реактора $L1$; C_1 – суммарная емкость конденсаторов $C2...C7$; C_2 – суммарная емкость конденсаторов $C8$ и $C9$; R_2, L_2, C_3 – входные параметры испытуемого статического преобразователя; K_1 и K_2 – управляемые ключи, выполняющие функции транзисторов $VT1$ и $VT2$

Fig. 2. The generalized scheme of the developed power circuit (Fig.1), brought to the secondary side of the output transformer $TV1$: $E_1 = U_{амп} = 7000$ В – EMF of the input voltage source; $E_2 = U_{ном} = 3000$ В – EMF of the static converter power supply; $R_1 = 3$ ohm and $L_1 = 27$ мН – resistance and inductance of the $L1$ power reactor; C_1 – the total capacitance of $C2...C7$ capacitors; C_2 – the total capacitance of $C8$ and $C9$; R_2, L_2 и C_3 – input parameters of the static converter under test; K_1, K_2 – controlled keys that perform the functions of $VT1$ and $VT2$ transistors

В качестве примера рассмотрена силовая схема ИП, функционирующая с испытуемым преобразователем собственных нужд типа ПСН110 У1, который предназначен для пригородных электропоездов типа ЭП2Д. Указанный преобразователь имеет входные эквивалентные индуктивность $L_2 = 60 \cdot 10^{-3}$ Гн и емкость $C_3 = 7000 \cdot 10^{-6}$ Ф [8]. При этом система управления рассматриваемого преобразователя ПСН110 У1 при обнаружении недопустимого импульса входного перенапряжения (выше 4000 В) посредством блока защиты вводит входное сопротивление $R_2 = 80$ Ом [8, 9].

Ранее упоминалось, что на интервале времени, при котором происходит нарастание выходного импульсного напряжения ИП, управляемый ключ K_1 замкнут, а управляемый ключ K_2 разомкнут. В этом случае схема замещения будет включать в себя по одной индуктивности и емкости в каждом из двух контуров, что приводит к уравнению четвертой степени. Решение такого уравнения сопряжено со значительными алгебраическими и вычислительными трудностями. Поэтому целесообразно упростить схему замещения, посредством которой формируется передний фронт требуемого импульса перенапряжения.

Анализ переходных процессов в разработанной силовой схеме ИП показал, что благодаря эквивалентной индуктивности L_1 и замкнутому состоянию управляемого ключа K_1 напряжение на эквивалентном входном конденсаторе C_3 преобразователя за заданное время 250 ± 50 мкс меняется незначительно. Данный фактор позволяет принять допущение об отсутствии влияния статического преобразователя на электромагнитные процессы за указанный интервал времени.

С учетом принятого допущения при замкнутом состоянии управляемого ключа K_1 операторная электрическая схема ИП принимает вид, показанный на рис. 3 [10–12]. При этом E_1 после замыкания управляемого ключа K_1 равно 10000 В, а входное напряжение $u_{ab}(t)$

испытуемого преобразователя равно напряжению на конденсаторе C_2 .

Начальное напряжение U_{C2} на конденсаторе C_2 полагаем равным 3000 В, а ЭДС E_1 принимаем равной 9500 В, что позволит исключить превышение напряжения 10000 В в конечной точке. Емкость конденсатора C_2 , Ф, определяем из амплитудных значений тока $I_{m1} = 41$ А и напряжения $U_{m1} = 10000$ В на заданном интервале времени $t_1 = 300$ мкс:

$$C_2 = \frac{I_{m1} t_1}{U_{m1}} = \frac{41 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{10000} \approx 1,2 \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что результаты проведенных расчетов предполагают относительную погрешность от 3 до 7% в ту или иную сторону в зависимости от того, какие из заданных параметров при вводе их в уравнения подвергаются допустимой коррекции.

Для представленной схемы операторное уравнение имеет вид:

$$R_1 I(p) + L_1 p I(p) + U_{C2}(p) = E_1(p). \quad (3)$$

После подстановки $I(p) = C_2 p U_{C2}(p) - C_2 E_{02}$ в (3) получаем изображение напряжения на конденсаторе C_2 :

$$U_{C2}(p) = U_{ab}(p) = \frac{E_1(p) + R_1 C_2 p E_{02} + L_1 C_2 p^2 E_{02}}{p(L_1 C_2 p^2 + R_1 C_2 p + 1)}. \quad (4)$$

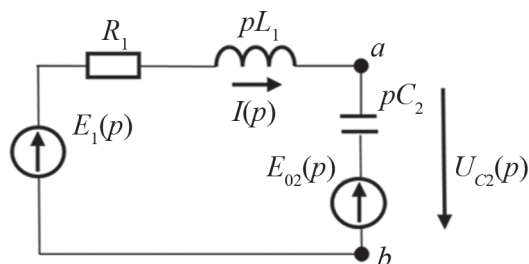


Рис. 3. Операторная электрическая схема при замкнутом ключе K_1
Fig. 3. Operator electrical circuit with a closed K_1

Находим корни из характеристического уравнения:

$$p_1 = -55,55 + j5555; \quad (5)$$

$$p_2 = -55,55 - j5555. \quad (6)$$

После преобразований определяем оригинал переходной функции напряжения:

$$u_{C_2}(t) = u_{ab}(t) = E_1 + \frac{E_1 + R_1 C_2 p_1 E_{02} + L_1 C_2 p_1^2 E_{02}}{p_1 (2L_1 C_2 p_1 + R_1 C_2)} e^{p_1 t} + \frac{E_1 + R_1 C_2 p_2 E_{02} + L_1 C_2 p_2^2 E_{02}}{p_2 (2L_1 C_2 p_2 + R_1 C_2)} e^{p_2 t}. \quad (7)$$

После ввода численных значений в (7) получаем выражение для расчета напряжения на конденсаторе C_2 при формировании переднего фронта импульса перенапряжения на входе испытуемого преобразователя в случае замкнутого состояния ключа K_1 (транзистора VT1):

$$u_{C_2}(t) = u_{ab}(t) = 9500 - 6500 \cos 5555t e^{-55,55t} + 65 \sin 5555t e^{-55,55t}. \quad (8)$$

При этом оригинал тока:

$$i(t) = 42 \sin 5555t e^{-55,55t}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого случая за интервал времени от 0 до 300 мкс согласно (8) построена кривая нарастания входного напряжения испытуемого преобразователя (рис. 4). Аналогичная кривая была получена посредством компьютерного моделирования силовой схемы ИП в среде *Simulink* пакета *MATLAB* [13–15]. Сравнительный анализ показывает, что расхождение между значениями, вычисленными по выражению (8) и полученными с помощью компьютерного моделирования, не превышает 3%. Это подтверждает достоверность принятого допущения о незначительном влиянии входных параметров статического преобразователя на выходное импульсное напряжение разработанного ИП при нарастающем фронте за упомянутый интервал времени.

Во время спада импульсного напряжения ИП управляемый ключ K_1 разомкнут, а управляемый ключ K_2 замкнут. В этом случае операторная электрическая схема принимает вид, показанный на рис. 5. При этом начальные условия на реактивных элементах силовой схемы ИП равны соответствующим конечным значениям после формирования переднего фронта. Также приняты следующие начальные условия: напряжение E_{01} на конденсаторе C_1 силовой схемы ИП равно 7000 В; напряжение E_2 источника питания испытуемого преобразователя остается на предыдущем уровне 3000 В; напряжение E_{03} на входном конденсаторе C_3 преобразователя равно 3000 В.

С учетом того, что требуемый фронт спада импульса должен быть сформирован за время $t_2 = 2500$ мкс от заданных начального значения 10000 В до конечного значения 5000 В, то емкость конденсатора C_1 , Ф, можно определить из амплитудных значений тока $I_{m2} = 45$ А и напряжения $U_{m2} = 5000$ В на заданном интервале длительности:

$$C_1 = \frac{I_{m2} t_2}{U_{m2}} = \frac{45 \cdot 2500 \cdot 10^{-6}}{5000} \approx 23 \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

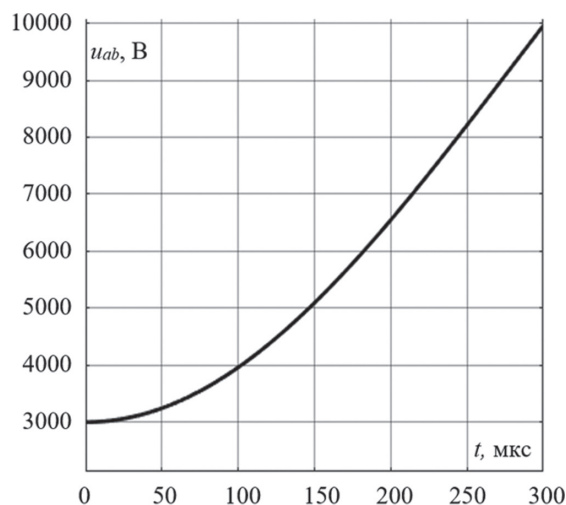


Рис. 4. Кривая нарастания входного напряжения испытуемого преобразователя

Fig. 4. The rise curve of the input voltage of the test converter

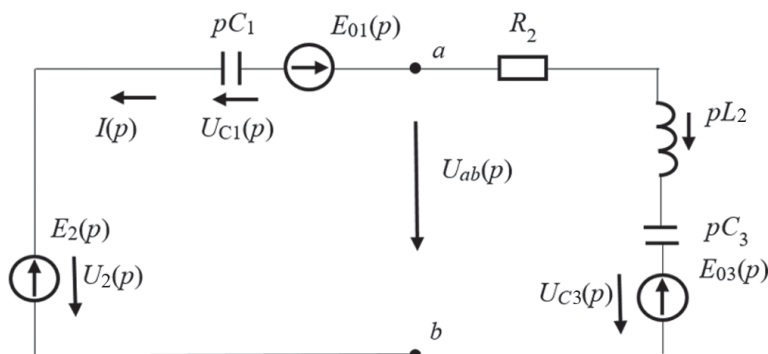


Рис. 5. Операторная электрическая схема при замкнутом ключе K_2

Fig. 5. Operator electrical circuit with a closed K_2

Для указанной схемы операторное уравнение имеет вид:

$$U_2(p) + U_{C1}(p) - U_{C3}(p) + L_2 p I(p) + R_2 I(p) = 0. \quad (11)$$

В связи с тем, что

$$U_{C1}(p) = \frac{I(p) + C_1 E_{01}}{C_1 p}; \quad (12)$$

$$U_{C3}(p) = \frac{I(p) + C_3 E_{03}}{C_3 p}, \quad (13)$$

то, подставив (12) и (13) в (11), получим:

$$U_2(p) + \frac{I(p) + C_1 E_{01}}{C_1 p} - \frac{I(p) + C_3 E_{03}}{C_3 p} + L_2 p I(p) + R_2 I(p) = 0. \quad (14)$$

После подстановки $E_2 = E_{03}$ определим изображение тока:

$$I(p) = \frac{-C_1 C_3 E_{01}}{L_2 C_1 C_3 p^2 + R_2 C_1 C_3 p - C_1 + C_3}. \quad (15)$$

В результате найдены корни из характеристического уравнения:

$$p_1 = -666,7 + j527,1; \quad (16)$$

$$p_2 = -666,7 - j527,1. \quad (17)$$

Выполнив известные преобразования, запишем оригинал переходной функции тока:

$$i(t) = \frac{-C_1 C_3 E_{01}}{2L_2 C_1 C_3 p_1 + R_2 C_1 C_3} e^{p_1 t} + \frac{-C_1 C_3 E_{01}}{2L_2 C_1 C_3 p_2 + R_2 C_1 C_3} e^{p_2 t}. \quad (18)$$

После ввода численных значений в (18) и соответствующих подстановок окончательно получаем:

$$i(t) = 219,5 \sin 527,1 e^{-666,7t}. \quad (19)$$

Соответственно оригиналы переходных функций напряжения:

$$u_{C1}(t) = 8750 \sin 527,1 t e^{-666,7t} + 6975 \cos 527,1 t e^{-666,7t}; \quad (20)$$

$$u_{ab}(t) = 3000 + 8750 \sin 527,1 t e^{-666,7t} + 6975 \cos 527,1 t e^{-666,7t}. \quad (21)$$

Для рассматриваемого случая на интервале времени от 0 до 2500 мкс посредством вычисления (21) построена кривая спада входного напряжения испытуемого преобразователя (рис. 6). Аналогичная кри-

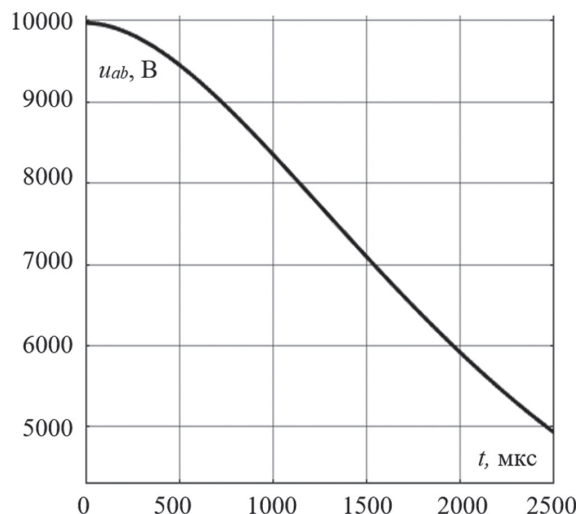


Рис. 6. Кривая спада входного напряжения испытуемого преобразователя

Fig. 6. The curve of the input voltage drop of the test converter

вая входного напряжения была получена посредством компьютерного моделирования в среде Simulink пакета MATLAB. Сравнительный анализ показывает, что расхождение между данными, вычисленными по (21) и полученными с помощью компьютерного моделирования, не превышает 0,3%.

Общий вид совмещенных кривых нарастания и спада входного напряжения испытуемого преобразователя, полученных в результате аналитического решения, представлен на рис. 7.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что на заданных временных интервалах полученные аналитические выражения достаточно точно описывают переходные характеристики обоих фронтов импульса напряжения на испытуемом преобразователе, что подтверждается компьютерным моделированием процессов.

Результаты экспериментальной проверки. С целью экспериментальной проверки работоспособности предложенной силовой схемы ИП и правомерности полученных аналитических выражений был изготовлен макетный образец ТКС200.400.000.00 (ТКС200), основные компоненты которого приведены в табл. 2.

Также в ТКС200 были применены плата управления ТКР31.500.000.00, реализующая заданный алгоритм работы ИП, и драйверы SKYPER12, формирующие сигналы управления IGBT-транзисторов VT1 и VT2. Конструктивно ТКС200 представляет собой панель (рис. 8), на которой расположены электронные компоненты, входной контактор и конденсаторы C1...C9 устройства. При этом реактор L1 и выходной трансформатор TV1 установлены вне данной панели.

На панели также расположена зеленая кнопка, посредством которой производят запуск заданного одиночного импульса перенапряжения.

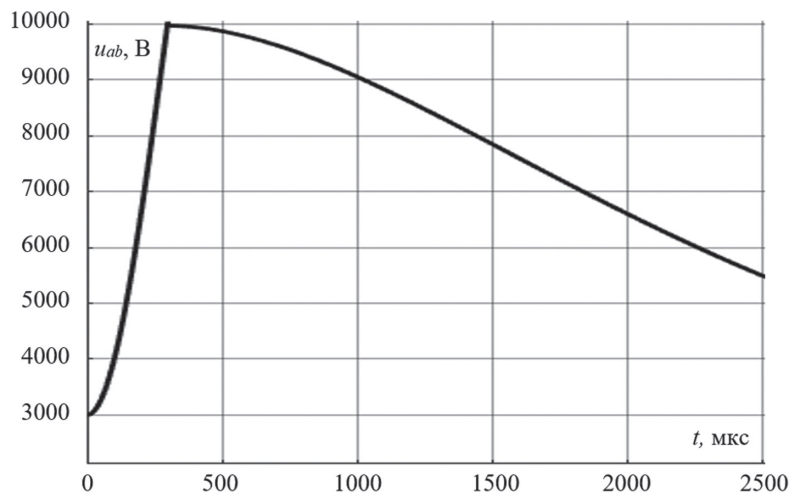


Рис. 7. Общий вид кривой входного напряжения испытуемого преобразователя

Fig. 7. General view of the input voltage curve of the test converter

Таблица 2

Основные компоненты макетного образца

Main components of the sample

Наименование компонента	Обозначение на рис. 1	Тип компонента	Изготовитель
Транзистор IGBT	VT1, VT2	Simix603GB124p	Semikron, Германия
Диод	VD1, VD2	SKKD105F12	Semikron, Германия
Реактор	L1	TKC200.490.000.00	Трансконвертер, Россия
Трансформатор	TV1	TKC200.491.000.00	Элдек, Россия

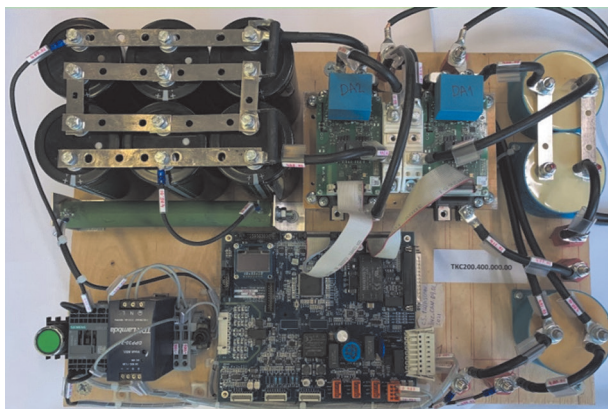


Рис. 8. Внешний вид панели TCS200

Fig. 8. Appearance of the TCS200 panel

Параметры реактивных компонентов ТКС200 были рассчитаны с использованием выведенных аналитических выражений для случая проведения совместного испытания с преобразователем собственных нужд ПСН100 У1 (ПСН), предназначенным для преобразования входного номинального напряжения 3000 В постоянного тока в гальванически развязанные двухканальные выходные напряжения 380 и 220 В трехфазного переменного тока с частотой 50 Гц.

До начала эксперимента вторичная обмотка w_2 выходного трансформатора ТКС200 и входные клеммы ПСН были подключены последовательно с источником входного напряжения 3000 В постоянного тока испытательного стенда СИП200.

В начале эксперимента был осуществлен первый режим работы ИП, при котором были заряжены накопительные конденсаторы $C2...C7$ и подано входное напряжение 3000 В постоянного тока на последовательно соединенные ТКС200 и ПСН. Затем в штатном порядке был осуществлен запуск и подключена нагрузка к ПСН мощностью 105 кВ·А. После выхода ПСН на установившийся режим работы был подан одиночный импульс перенапряжения от ТКС200.

На рис. 9 представлена осциллограмма входного импульсного напряжения ПСН (кривая коричневого цвета) и тока (кривая зеленого цвета), протекающего через резистор $R1$, установленного в блоке защиты ПСН. Анализ приведенной осциллограммы показывает, что амплитуда импульса перенапряжения, которую формирует ТКС200, равна 10 кВ. При этом интервал времени нарастания импульса перенапряжения до 10 кВ составляет 240 мкс, а интервал спада импульса перенапряжения с 10 до 5 кВ равен 2,1 мс, что соответствует требованиям п. 4.9.3.5 ГОСТ33726-2016 (табл. 1).

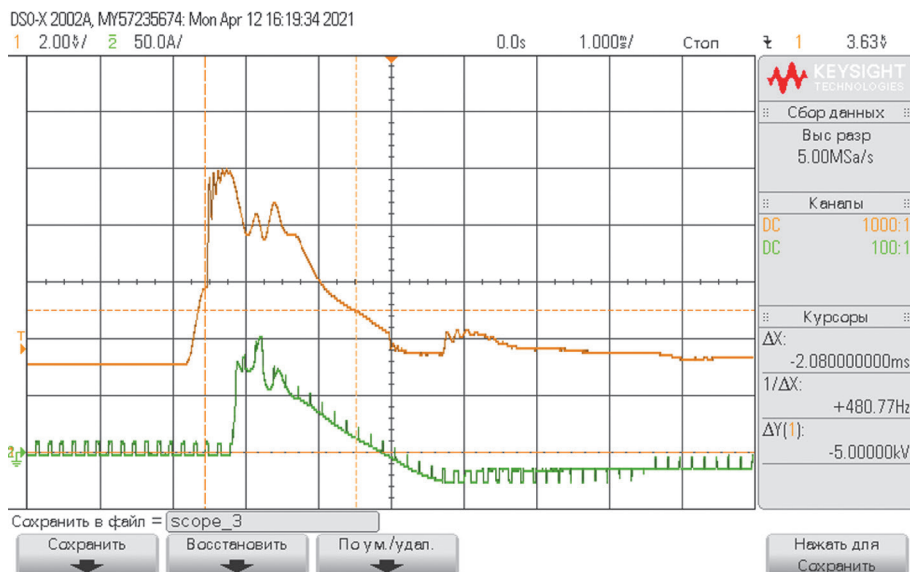


Рис. 9. Осциллограмма входного импульсного напряжения и тока ПСН

Fig. 9. Oscillogram of the input pulse voltage and current of the converter of own need

Выводы. Разработанная силовая схема имитатора обеспечивает с заданной амплитудой раздельное нарастание и спад импульсного высоковольтного перенапряжения с учетом входных параметров конкретного статического преобразователя.

Полученные аналитические выражения позволяют исследовать с приемлемой точностью электрические процессы разработанной силовой схемы имитатора. Расхождение между вычисленными данными и результатами, полученными с помощью компьютерного моделирования, при нарастании и спаде выходного импульсного напряжения не превышает 3 и 0,3 % соответственно.

Экспериментальная проверка подтвердила, что макетный образец имитатора, разработанный с использованием полученных аналитических выражений, формирует выходное импульсное высоковольтное перенапряжение на преобразователе собственных нужд ПСН110 У1 в соответствии с требованиями п. 4.9.3.5 ГОСТ33726-2016.

Полученные результаты представляют интерес для специалистов – проектировщиков испытательного оборудования в части воздействия перенапряжений на статические высоковольтные преобразователи как для железнодорожного транспорта, так и для промышленного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость. М.: Энергоатомиздат, 1995, 480 с.
2. Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех. М.: Энергоатомиздат, 1981, 224 с.

3. Воршевский А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости технических средств по импульсным помехам в судовых электрических системах: дис. ... докт. техн. наук, 2007, 507 с.

4. ТР ТС 001/2011. Технический регламент ТС "О безопасности железнодорожного подвижного состава", 2011.

5. ГОСТ 33726-2016. Преобразователи статические нетяговые для железнодорожного подвижного состава. М.: Стандартинформ, 2016, 26 с.

6. Makarov S.N., Stephen R.L., Bitar J. Practical Electrical Engineering. Washington, USA: Worcester Polytechnic Institute, 2016, 986 p.

7. Sepehr A., Saradarzadeh M., Farhangi S. High-voltage Isolated Multioutput Power Supply for Multilevel Converters. – Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2017, vol. 25(4), pp. 3319–3333.

8. Вольский С.И. и др. Преобразователь собственных нужд ПСН110 У1 для электропоезда ЭП2Д. – Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, 2017, № 1 (75), с. 12–21.

9. Volskiy S., Skorokhod Y. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction. – 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, 2020, pp. 133–137.

10. Бессонов Л.А., Бессонов В.Л. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2019, 831 с.

11. Потапов Л.А. Теоретические основы электротехники. СПб.: Лань, 2016, 376 с.

12. Евсеев М.Е. Теоретические основы электротехники. СПб.: Политехника, 2008, 320 с.

13. Дементьев Ю.Н., Терехин В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. М.: Юрайт, 2019, 306 с.

14. Дементьев Ю.Н. и др. Компьютерное моделирование электротехнических систем постоянного и переменного тока в среде Matlab Simulink. Томск: Изд-во ТПУ, 2018, 497 с.

15. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink. Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004, 376 с.



Авторы: **Вольский Сергей Иосифович** – доктор техн. наук, профессор кафедры "Электроэнергетика, электромеханика и биотехнические системы" Московского авиационного института (национального исследовательского университета).



Скорород Юрий Юрьевич – начальник конструкторского бюро ООО "Трансконвертер".



Корнев Александр Сергеевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование судов» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.



Виколов Илья Павлович – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Elektrichestvo, 2021, No. 11, pp. 18–27

DOI:10.24160/0013-5380-2021-11-18-27

A Pulse High-Voltage Overvoltage Simulator

VOLSKIY Sergey I. (Moscow Aviation Institute (the National Research University), Moscow, Russia) – Professor of the Electrical Power, Electromechanics and Biotechnical Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.).

KORNEV Alexander S. (St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia) – Professor of the Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships Dept., Dr. Sci. (Eng.).

SKOROKHOD Yuriy Yu. (Transconverter LLC, Moscow, Russia) – Head of the Design Office.

VIKULOV Ilya P. (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia) – Docent of the Electric Traction dept., Cand. Sci. (Eng.).

The electrical circuit of a simulator of pulse high voltage overvoltages with an amplitude of up to 10 kV DC, which is intended for testing the stability of solid-state power converters to emergency conditions according to item 4.9.3.5 of State Standard GOST 33726-2016, is proposed. By using the developed simulator, a high voltage pulse with the required values of amplitude, duration, and rising and falling rates can be obtained. Analytical expressions are derived that describe, with sufficient accuracy, the transients in the electrical circuits of the proposed pulse high voltage overvoltage simulator, which is confirmed by computer simulation carried out in the MATLAB Simulink environment. Based on the obtained theoretical results, a mockup simulator for testing the stability of a high-voltage power converter to overvoltage of a given shape and amplitude has been developed. The results of practical use of the developed simulator on the example of testing the PSN110 U1 auxiliary converter are given. The article may be of interest to specialists who design equipment for carrying out overvoltage tests of solid-state high-voltage converters for both railway transport and industrial applications.

Key words: pulse high-voltage overvoltage simulator, high-voltage power converter, emergency mode, direct current

REFERENCES

1. **Shvab A.Y.** *Elektromagnitnaya sovместimost'* (Electromagnetic Compatibility). M.: Energoatomizdat, 1995, 480 p.
2. **Gurvich I.S.** *Zashchita EVM ot vneshnih pomekh* (Protection of Computers from External Interference). M.: Energoatomizdat, 1981, 224 p.
3. **Vorshevskiy A.A.** *Obespechenie elektromagnitnoy sovместimosti tekhnicheskikh sredstv po impul'snym pomekham v sudovykh elektricheskikh sistemah: dis. ... dokt. tekhn. nauk* (Ensuring Electromagnetic

Compatibility of Technical Means for Pulse Interference in Ship Electrical Systems: Dis... Dr. Sci. (Eng.)), 2007, 507 p.

4. **TR TS 001/2011.** *Tekhnicheskiiy reglament TS "O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava"* (Technical Regulations TS "On the safety of Railway rolling stock"), 2011.

5. **GOST 33726-2016.** *Preobrazovateli staticheskie netyagovye dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Static Non-Tractive Converters for Railway Rolling Stock). M.: Standartinform, 2016, 26 p.

6. **Makarov S.N., Stephen R.L., Bitar J.** *Practical Electrical Engineering*. Washington, USA: Worcester Polytechnic Institute, 2016, 986 p.

7. **Sepehr A., Saradarzadeh M., Farhangi S.** High-voltage Isolated Multioutput Power Supply for Multilevel Converters. – Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2017, vol. 25(4), pp. 3319–3333.
8. **Volskiy S.I., et al.** *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya – in Russ. (Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Construction)*, 2017, No. 1 (75), pp. 12–21.
9. **Volskiy S., Skorokhod Y.** Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction. – 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, 2020, pp. 133–137.
10. **Bessonov L.A., Bessonov V.L.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric Circuits). M.: Yurayt, 2019, 831 p.
11. **Potapov L.A.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). SPb.: Лань, 2016, 376 p.
12. **Евсеев М.Е.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). SPb.: Politehnika, 2008, 320 p.
13. **Dementiev Yu.N., Terekhin V.B.** *Komp'yuternoe modelirovaniye sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink* (Computer Modeling of DC and AC Electric Drive Systems in Simulink). M.: Yurayt, 2019, 306 p.
14. **Dementiev Yu.N., et al.** *Komp'yuternoe modelirovaniye elektrotekhnicheskikh sistem postoyannogo i peremennogo toka v srede Matlab Simulink* (Computer Modeling of Electrical Systems of Direct and Alternating Current in the Matlab Simulink Environment). Tomsk: Izd-vo TPU, 2018, 497 p.
15. **Terekhin V.V.** *Osnovy modelirovaniya v MATLAB. Chast' 2. Simulink* (Basics of Modeling in MATLAB. Part 2. Simulink). Novokuznetsk: Kuzbassvuzizdat, 2004, 376 p.

[16.08.2021]