

## Цифровая модель генератора импульсных напряжений с выходным напряжением до 7 МВ в MATLAB/Simulink

Д.В. Примаченко\*, А.В. Боешко, Н.К. Куракина, Р.И. Жилиготов, Н.В. Образцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*primachenko.den@gmail.com

**Аннотация:** Генераторы импульсного напряжения широко применяются для испытаний изоляционной прочности электрооборудования. Создание цифровой модели ГИН установки позволяет снизить расходы при настройке оборудования и выборе параметров для проведения последующих испытаний. В данной работе представлена модель генератора импульсного напряжения, разработанная в среде MATLAB/Simulink. Получены осциллограммы импульсного разряда, проведено их сравнение с формой импульса из нормативных документов.

**Ключевые слова:** Генератор импульсных напряжений, MATLAB/Simulink, высоковольтный разряд, испытания на прочность изоляции, грозовой импульс, форма импульса.

### 1. Введение

Генераторы импульсных напряжений (ГИН) имеют широкую область использования в различных отраслях промышленности. Они наиболее распространены в испытаниях оценки работоспособности летательных средств после попадания в них молнии [1, 2] и для тестирования прочности изоляции электрооборудования [3]. Однако, ввиду технологических требований сборки ГИН для создания импульсов в несколько миллионов вольт, высоких затрат на электроэнергию, высокой стоимости компонентов ГИН и их регулярного обслуживания такие испытания часто бывают дорогими.

Создание цифровой модели ГИН является актуальной задачей, так как позволяет сократить количество предварительных испытаний, снизить риски повреждения дорогостоящего оборудования и сократить время, необходимое на наладочные работы.

В настоящей работе модель ГИН создается на основе установки, находящейся на территории СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург. Характеристики установки: выходное напряжение 7 МВ, энергия импульса 560 кДж. Такие параметры позволяют проводить различные испытания и эксперименты. Основной задачей является создание цифровой модели ГИН с выходным напряжением 7 МВ, генерирующей импульс напряжения, соответствующий нормативной документации.

Конструкция ГИН, также известная как генератор Аркадьева-Маркса, впервые была представлена в 1916 году. Принцип работы представлен на Рис. 1 и основан на том, что группа параллельно соединенных конденсаторов заряжается до определенного напряжения. Затем с помощью коммутирующих устройств, таких как шаровые разрядники ( $F1-F5$ ), конденсаторы переключаются в последовательную цепь. В результате напряжение, проходящее через все конденсаторы, становится суммой напряжений каждого конденсатора, то есть умножается на количество конденсаторов [4].

Тем не менее, несмотря на свою простоту и длительное использование, схема, представленная на Рис. 1, практически не используется для сверхмощных установок с выходным импульсом в несколько мегавольт [5]. Это связано с тем, что большое количество ступеней и соответствующих компонентов значительно увеличивает стоимость устройства. Поэтому для ГИН с такими высокими параметрами напряжения применяются схемы, в которых на каждой ступени используются два конденсатора. Две наиболее распространенные схемы представлены на Рис. 2. Принцип их работы остаётся тем же самым, отличаясь лишь тем, что требуется большее время на зарядку дополнительного уровня конденсаторов. В результате, проходя один этаж конденсаторов  $C$ , разряд будет больше, чем было на схеме на Рис. 1.

Одним из основных параметров ГИН является коэффициент повышения напряжения. Это значение показывает, во сколько раз увеличивается напряжение после прохождения коммутирующих устройств. Если сравнить значения между схемами на Рис. 2, они незначительно отличаются друг от друга:

- На схеме на рисунке 2 (а):  $K_2 \approx 1.5$ ,  $K_3 \approx 2.5$ ;
- На схеме на рисунке 2 (б):  $K_2 \approx 2$ ,  $K_3 \approx 3$ ;

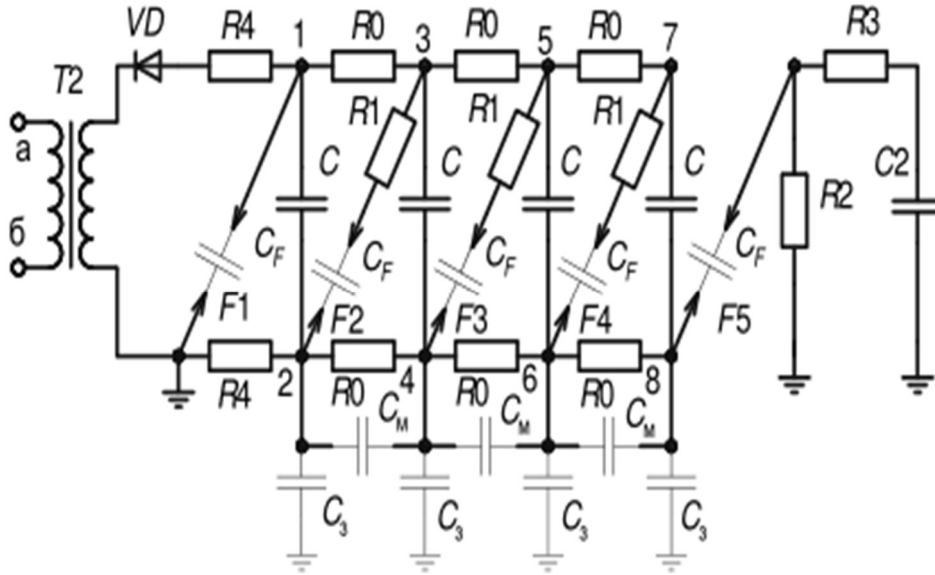


Рис. 1. Принципиальная схема генератора Аркадьева-Маркса.

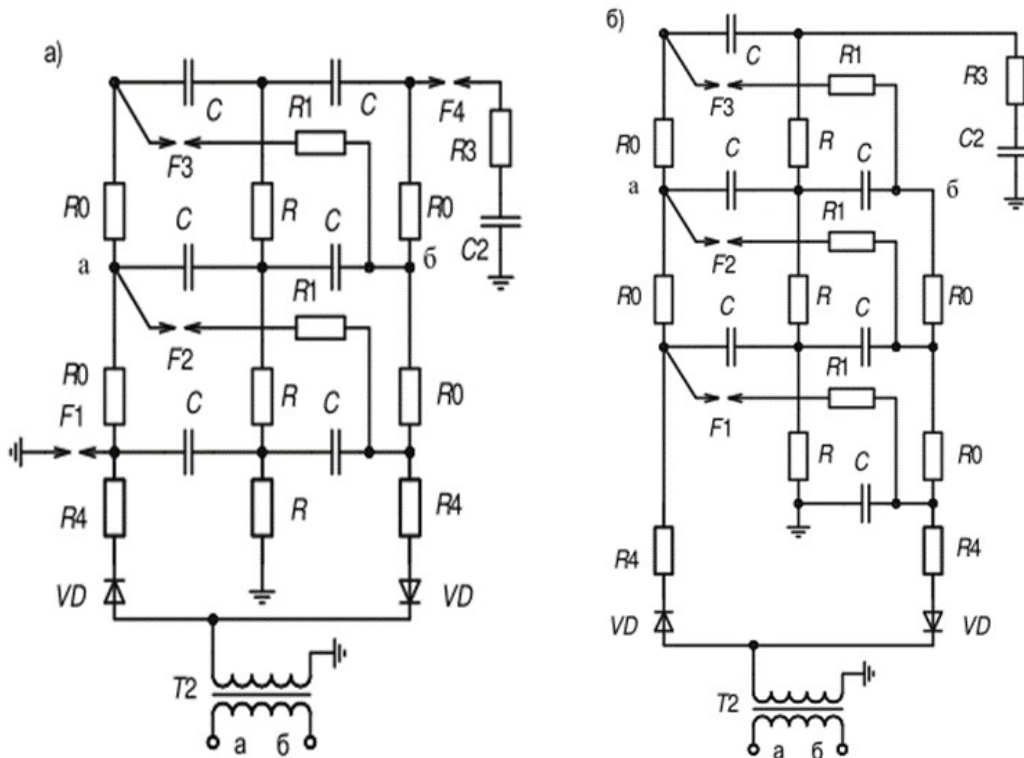


Рис. 2. Схемы ГИН с двумя конденсаторами: а) – на ступени, б) – на полуступени.

## 2. Разработка модели

В среде разработки MATLAB/Simulink создана модель генератора импульсных напряжений. На Рис. 3 изображён подробный вид первого этажа модели, где отображены основные элементы схемы. На Рис. 4, представлен полный вид модели, она содержит 28 ступеней батарей конденсаторов. Представленная модель ГИН основана на полуступенчатом типе соединения.

При создании модели устанавливаются следующие параметры программы:

- Шаг дискретизации – 1 мкс. Была проведена проверка сходимости и установлено, что данный шаг дискретизации по отношению ко времени расчета модели будет оптимальным. Увеличение точности приведет к ненужному увеличению времени расчётов, а уменьшение – к получению графика с большим количеством неточностей.
- Решатель – ode23tb. Этот решатель был выбран как оптимальный по соотношению сходимости и времени расчета модели.

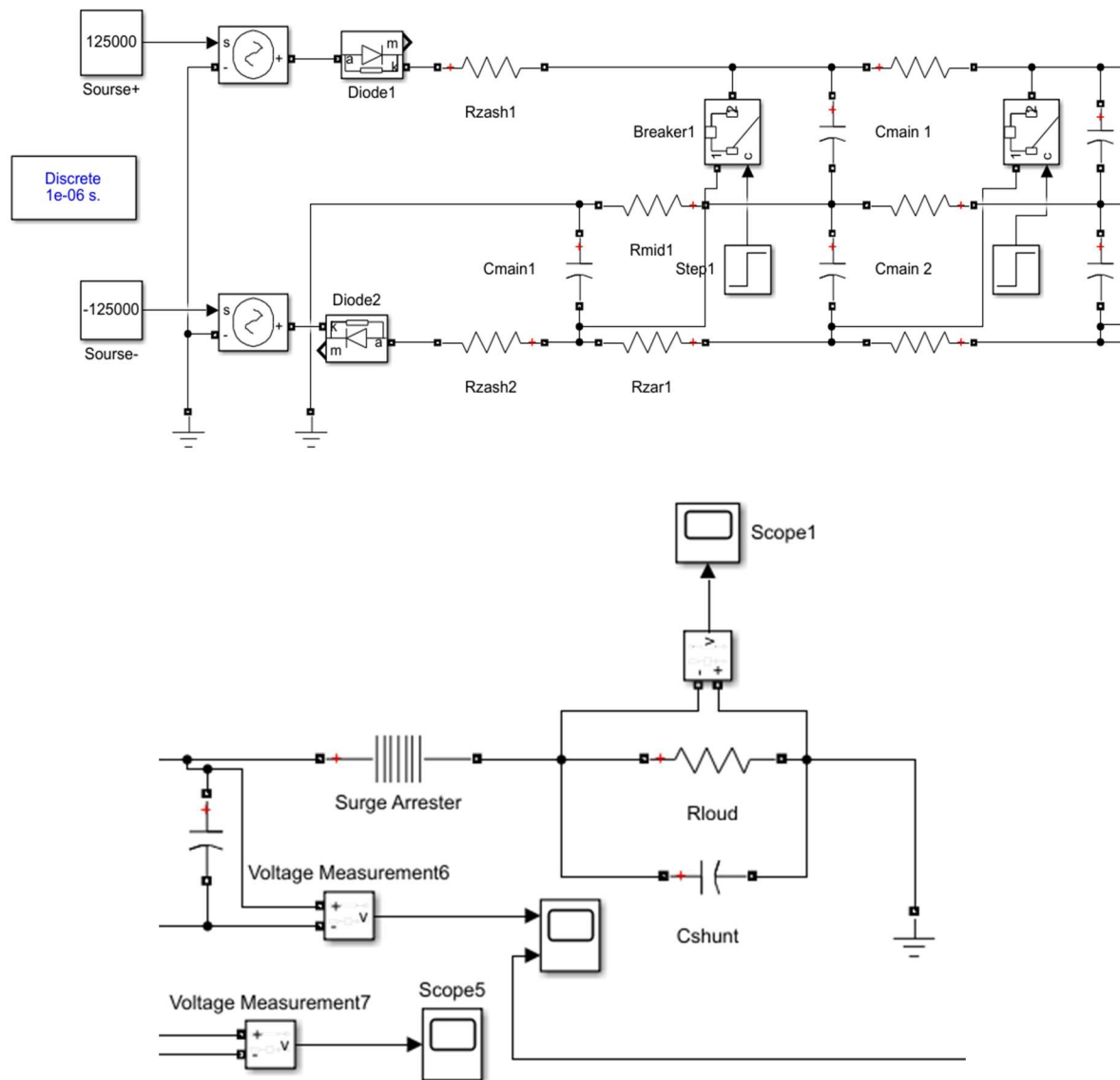


Рис. 3. Схема генератора импульсного напряжения, собранная в среде MATLAB/Simulink (сверху – первый этаж, снизу – и последний этаж).

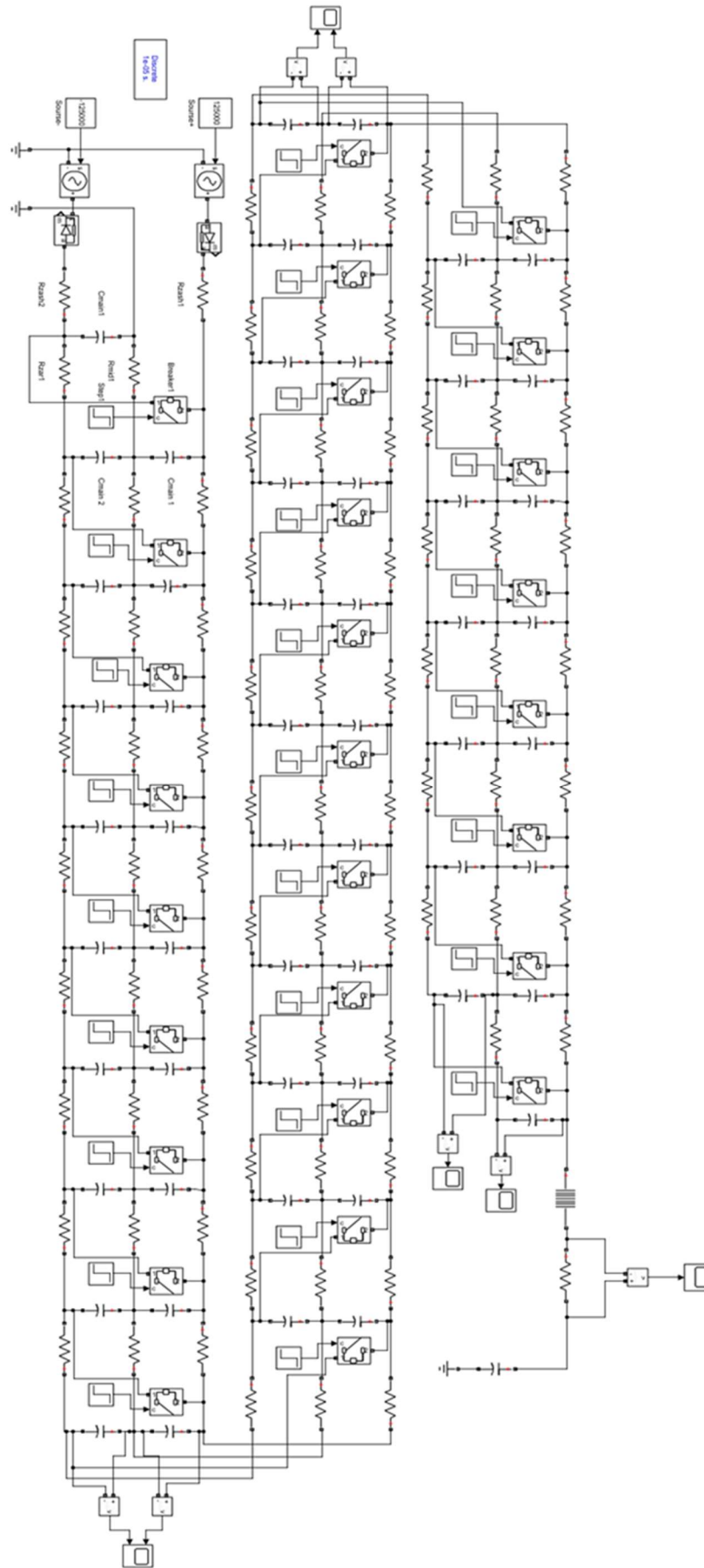


Рис. 4. Схема генератора импульсного напряжения, собранная в среде MATLAB/Simulink (общий вид).

Основными элементами модели являются следующие блоки:

- Блок “Constant” генерирует сигнал ввода значения. В модели используется два таких блока для имитации положительной и отрицательной полуволн переменного тока, обеспечивая питающее напряжение  $U = 125$  кВ;
- Блок “Diode” выполняет функцию однонаправленного вентиля электрического тока. В созданной модели данные элементы используются для предотвращения неверного направления полярности. Данный блок содержит шунтирующие сопротивление. Их значения  $R_{shunt} = 500$  Ом;
- Блок “Series RLC Branch” тип C выполняет функцию конденсатора. В модели используется два типа конденсаторов:
  - $C_{main}$  – главный подтип конденсаторов. В реальной установке каждая ступень состоит из двух батарей конденсаторов, состоящих из 8 конденсаторов емкостью  $C = 150$  нФ. Для имитации этих параметров в созданной модели используются блоки с общей емкостью  $C_{main} = 1.2$  мкФ;
  - $C_{shunt}$  – конденсаторы, используемые для шунтирования нагрузки, обеспечивая более плавную форму импульса после грозового разряда. Они подключены параллельно к нагрузке с емкостью  $C_{shunt} = 10^{-13}$  Ф;
- Блок “Series RLC Branch” тип R выполняет функцию резистора. В модели используются четыре типа сопротивлений:
  - $R_{zash}$  – защитные резисторы. Располагаются сразу после диода как для положительной, так и для отрицательной полярности. Значение  $R_{zash} = 30$  кОм;
  - $R_{zar}$  – зарядные резисторы. Размещаются между элементами конденсаторов на каждой ступени, чтобы обеспечить равномерную зарядку конденсаторов. Значение  $R_{zar} = 70$  кОм;
  - $R_{mid}$  – сопротивление средней линии. Выбирается таким образом, чтобы обеспечить параллельное соединение конденсаторов на одной ступени при их последовательном переключении. Значение  $R_{mid} = 60$  кОм;
  - $R_{load}$  – резистор, имитирующий нагрузку испытания. Значение  $R_{load} = 1000$  МОм.
- Блок "Surge Arrester" выполняет функцию коммутирующего устройство (шаровой разрядник). Он используется для пробоя воздушного промежутка при достижении определенной разности потенциалов между его контактами. В модели присутствует один такой блок перед нагрузкой;
- Блок "Breaker" работает как ключ, замыкающийся при выполнении заданных условий логических блоков. В модели выполняет функцию основного шарового разрядника. Время пробоя моделируется замыканием блока в заданный момент времени. Активация блоков "Breaker" происходит по сигналу от блока "Step".
- Блок "Step" – блок, который выдаёт сигнал "включить/выключить" в указанное время. В данной модели блок "Step" управляет подачей сигнала на первый блок "Breaker" в момент времени  $t_{start} = 87$  с. Каждый последующий блок получает сигнал с задержкой 5.5 мкс от предыдущего для имитации времени задержки пробоя.

### 3. Обсуждение результатов

На Рис. 6 представлено сравнение полученной формы импульса молнии (верхняя часть) с характеристикой грозового импульса описанного в ГОСТ Р 55194-2012 "Электрооборудование и электроустановки переменного тока напряжением от 1 до 750 кВ. Общие методы испытания электрической прочности изоляции" [6].

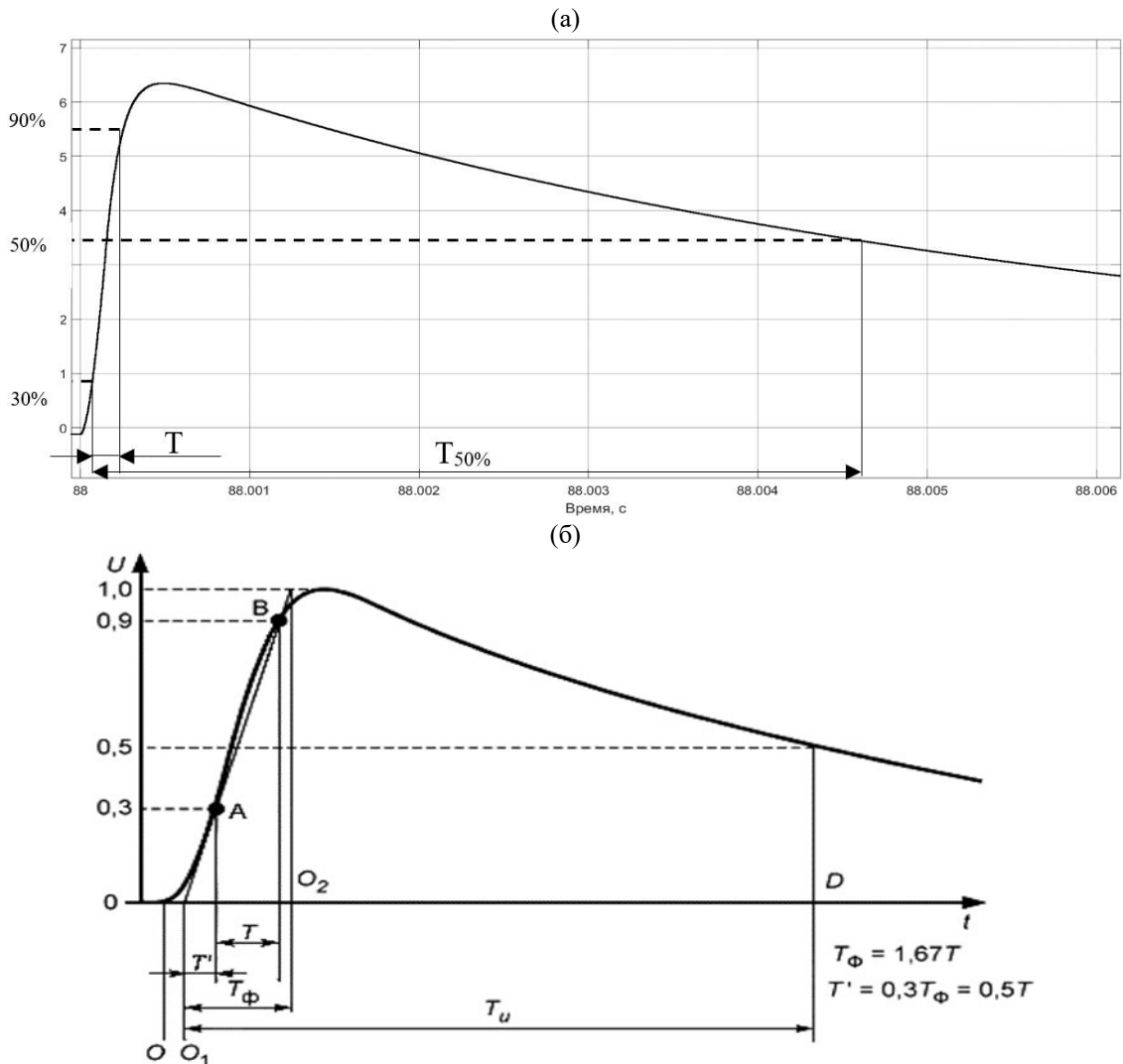


Рис. 4. Временные характеристики грозового импульса: (а) – полученная по итогам моделирования; (б) – из нормативных документов.

Характеристика смоделированного грозового разряда полностью соответствует характеристике из нормативных документов. Более крутой фронт нарастания полученного импульса, обусловлен использованием элементов "Breaker" и "Step" для имитации действия шарового разрядника

Одной из главных характеристик, которой должна соответствовать установка, является форма воспроизводимого грозового разряда. Она описывается благодаря её временным параметрам. Полученный импульс имеет следующие временные характеристики:

- $T$  – время, за которое напряжения вырастает от 30 до 90%. В данном случае  $T \approx 250$  мкс. Соответствует точке А формы импульса из нормативных документов;
- $T_\phi$  – длительность фронта импульса. Превышает в 1.67 раза величину  $T$ :

$$T_\phi = T \cdot 1.67 = 250 \cdot 1.67 \approx 400 \text{ мкс} \quad (1)$$

Соответствует точке В формы импульса из нормативных документов;

- $T_{50\%}$  – пятидесятипроцентный интервал времени. Время, которое потребуется импульсу, чтобы достичь максимального своего значения и уменьшиться до

половины от этого значения. Анализируя полученную осциллограмму, можно сказать, что  $T_{50\%} \approx 4500$  мкс. Соответствует промежутку  $T_U$  из нормативных документов;

В нормативных документах и литературе указываются временные характеристики разряда "500/2500" или "1000/5000" с учетом погрешностей на время роста фронта  $\pm 20\%$  и длительность пятидесятипроцентного импульса  $\pm 30\%$  [6]. Таким образом, смоделированный импульс характеризуется временными параметрами "400/4500", что с учётом погрешностей соответствует описанным ранее критериям.

Для полного соответствия всем нормативным характеристикам в модели необходимо учитывать точное время зарядки конденсаторов, потери, вызванные сопротивлениями и другие аспекты. Эти исследования и анализы будут продолжены в дальнейшем.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований разработана модель генератора импульсных напряжений в среде MATLAB/Simulink, с допущением использования элементов "ключей" в качестве шаровых разрядников. Полученная при моделировании форма импульса соответствует характеристике импульса, генерируемого на исследуемой установке ГИН в СПбПУ. Параметры импульса составляют "400/4500", что, учитывая допустимые погрешности, соответствует нормативным документам.

#### 5. Литература

- [1] А. Петровичев, Испытания на воздействие прямого удара молнии на авиационное оборудование, *Электроника НТБ*, №6, 1–4, 2020, doi: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.38.40
- [2] F. Wang, X. Ma, Y. Zhang, S. Jia, Lightning Damage Testing of Aircraft Composite – Reinforced Panels and Its Metal Protection Structures, *Appl. Sci.*, **8**, 1791, 2018, doi: 10.3390/app8101791
- [3] V. Frolov, D. Ivanov, A. Sivaev, Simulation of arc extinction in discharge chambers of lightning protection equipment, *Proceedings of the 10th international scientific symposium on electrical power engineering, Elektroenergetika 2019, Technical University of Kosice*, 143–146, 2019.
- [4] В.П. Смирнов, В.Е. Фортов, Э.Е. Сон и др., Мобильная установка на основе генератора импульсного напряжения для исследования влияния токового импульса на сопротивление грунта, *4-я Международная Конференция по Молниезащите*. Санкт-Петербург, Россия, 27–29 мая 2014.
- [5] Ю.Э. Адамьян, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, *Исследование импульсной прочности воздушной изоляции изоляционных конструкций с использованием генератора импульсных напряжений ГИН-600. Учебное пособие*. СПб.: СПбПУ, 2019.
- [6] ГОСТ Р 55195-2012. *Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции*, 2014.
- [7] R. Sousa Martins, C. Zaepffel, L. Chemartin, Ph. Lalande, A. Soufiani, Characterization of a high current pulsed arc using optical emission spectroscopy, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **49**, 415205, 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/41/415205