

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 615.472.03:615.847.8

**ПОСТРОЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ
НА ОСНОВЕ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
И ГАЗОРАЗРЯДНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА****С. А. Круглов**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-5992-7319, e-mail: pel.rgrtu@yandex.ru

А. А. Сережин, к.т.н., доцент, доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru

Д. С. Кусакин, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-1596-2136, e-mail: kusakinds@yandex.ru

Рассматривается задача построения на базе генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии систем питания, которые могут применяться в качестве контрольно-испытательных систем высоковольтного оборудования. Целью работы является построение нового типа высоковольтных импульсных генераторов напряжения при использовании комбинированного типа накопления энергии. Рассмотрены 2 способа построения высоковольтных систем (с высоковольтным электронным вентиляем, подключенным к нагрузочному конденсатору, и с применением импульсного трансформатора). На основе результатов компьютерного моделирования определены рабочие диапазоны значений величин для основных элементов схем.

Ключевые слова: генератор высоковольтных импульсов, индуктивный накопитель энергии, газоразрядный прерыватель тока, время заряда выходного конденсатора, время обрыва тока, высоковольтная система.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-135-143**Введение**

В настоящее время существуют различные схемотехнические решения по проектированию импульсных высоковольтных генераторов, сочетающие в себе различные способы и методы проектирования (классическая схема построения генераторов представлена на рисунке 1).

Существуют импульсные генераторы, построенные по классическим последовательным (параллельным) схемам заряда емкостных накопителей энергии (высоковольтные конденсаторы), с последующим разрядом в нагрузку через коммутирующий элемент, электронный вентиль (генераторы Аркадьева-Маркса, генераторы Финча, генераторы, выполненные по схеме Блюмляйна) [1-2]. Энергия электрического поля, передаваемая в нагрузку, накладывает определенные требования к применению коммутирующих элементов: способность выдерживать токи в десятки кА и высокое быстродействие на уровне наносекундного временного диапазона. К другому типу систем относятся высоковольтные импульсные генераторы, построенные по схемам накопления энергии магнитного поля в индуктивном контуре с током, при этом передача энергии в нагрузку происходит посредством размыкающих устройств – прерывателей тока [3].

Оба подхода имеют свои ключевые особенности, обуславливающие актуальность и необходимость их применения в ключевых отраслях промышленного сектора. Отличительными особенностями высоковольтных генераторов с применением индуктивного накопителя энергии (ИНЭ) являются: относительно низковольтное напряжение первичного источника питания (единицы кВ), высокое удельное значение запасаемой энергии, меньшие массогаба-

ритные показатели. При этом генераторы с применением емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) обеспечивают высокую отказоустойчивость и надежность, кроме того, при грамотном подходе к проектированию способны удерживать на заданном уровне амплитуду выходного напряжения. Однако в обоих случаях для передачи энергии в нагрузку необходимы высоко-точные наносекундные коммутаторы.

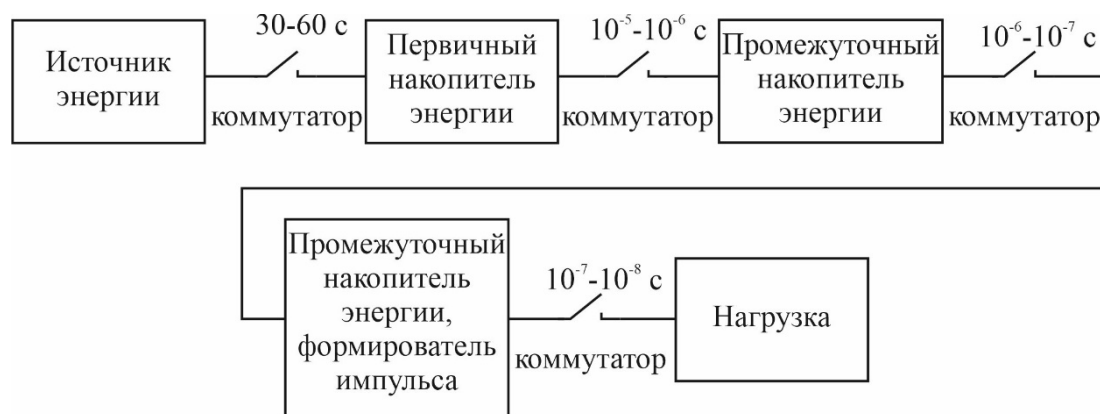


Рисунок 1 – Общая схема построения генераторов высоковольтных импульсов высокой мощности

Figure 1 – General scheme for constructing high-voltage pulse generators of high power

В данной работе представлен новый способ построения высоковольтных импульсных генераторов напряжения при использовании комбинированного типа накопления энергии, где в качестве первичного накопителя энергии используется индуктивный элемент, в качестве основного коммутирующего элемента применяется газоразрядный коммутатор тока [4-6]. Конструкция данной системы сочетает в себе преимущества обоих типов применяемых накопителей, имеет небольшие массогабаритные параметры относительно вышеописанных систем, при этом работа газоразрядного прерывателя тока в непрерывном частотном режиме обеспечивает регулирование амплитуды напряжения выходного импульса.

Подобное оборудование может применяться в качестве контрольно-испытательной системы изоляторов и высоковольтных разрядников [7], применяемых на объектах электроэнергетического комплекса и в высоковольтной электронике. Спрос на электроэнергию постоянно растет. В наши дни для удовлетворения данного спроса необходимо надежное высоковольтное электрооборудование для стабильной работы. Существует необходимость в надежном современном оборудовании для испытания изоляторов и высоковольтных разрядников, которое отвечает следующим условиям:

- обладает небольшими массогабаритными показателями и позволяет легко и быстро произвести контрольные испытания;
- повышает эффективность и производительность работающих объектов на линии и служит полезным инструментом для технического обслуживания;
- является безопасным в использовании.

Теоретическая часть

По своему конструктивному исполнению высоковольтная система представляет собой два схмотехнических решения. Первый вариант включает в себя высоковольтный электронный клапан (ЭК), подключенный к нагрузочному конденсатору, к аноду которого подводится выходное напряжение с генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным коммутатором тока (рисунок 2). Контроль формы и уровня токов и напряжений осуществляется с помощью осциллографа и датчиков тока, установленных перед разрядным коммутатором и нагрузочным конденсатором, делителя напряжения, подключенного через разделительный конденсатор, установленного перед высоковольтным ди-

одом, высоковольтного делителя в комбинации с высоковольтным щупом позволяют контролировать основные параметры: форму и уровень тока и напряжения в разрядном коммутаторе, форму и уровень выходного напряжения и тока в нагрузке.

В качестве второго варианта рассматривается схема с применением импульсного трансформатора (рисунок 3). В этом случае нагрузка подключается к индуктивному накопителю энергии, который выполняется в виде импульсного трансформатора, где индуктивность первичной обмотки выступает накопителем энергии, и амплитуда выходного напряжения пропорциональна коэффициенту трансформации.

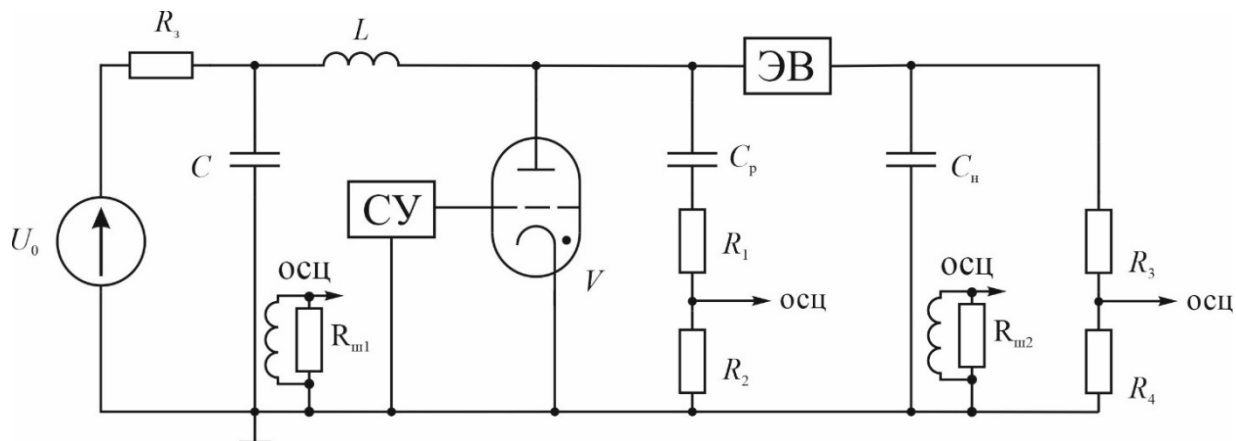


Рисунок 2 – Бестрансформаторная схема экспериментальной высоковольтной системы

Figure 2 – Transformerless circuit of experimental high-voltage system

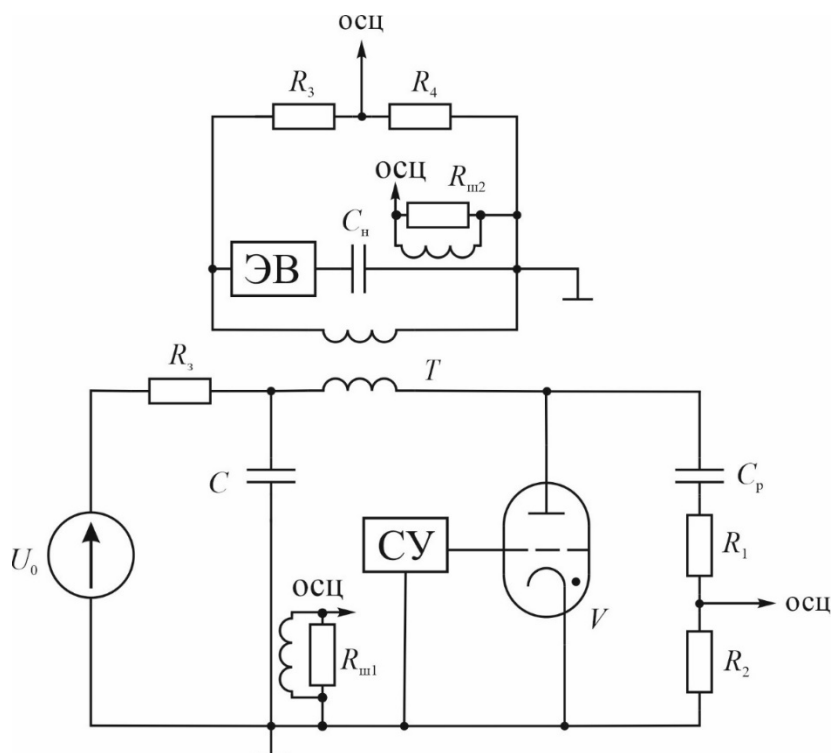


Рисунок 3 – Схема экспериментальной системы с применением импульсного трансформатора

Figure 3 – Experimental system circuit using a pulse transformer

В данном случае система может незначительно увеличить свои массогабаритные показатели, при этом она является гальванически связанной с нагрузкой, что обуславливает повышенные требования к электробезопасности на этапах проектирования конструкторской документации, сборки и отладки, в частности к системе управления (СУ) коммутатором.

Во втором случае обеспечивается гальваническая развязка за счет применения магнитосвязанного элемента, вследствие этого система управления коммутатором может быть сохранена без особых изменений. Кроме того, выходные значения тока и напряжения выходного конденсатора напрямую определяют параметры и габариты трансформатора, соответственно наличие трансформатора приводит к незначительному увеличению размеров высоковольтной системы.

Исследования высоковольтных систем с индуктивным накопителем энергии и газоразрядными прерывателями тока

Для исследования режима работы высоковольтной системы были проведены серии численных экспериментов по определению значений внешних элементов схем и определению электрических параметров. В обоих схемотехнических вариантах исполнения высоковольтной системы одним из ключевых компонентов является выходной высоковольтный конденсатор. С учетом того, что реальный газоразрядный коммутатор тиратронного типа способен коммутировать ток до 1 кА и выдерживать напряжение до 100 кВ, при этом способен работать в непрерывном частотном режиме (до 800 Гц), то скорость заряда выходного конденсатора до заданной величины напрямую определяет работу высоковольтной системы [8]. В связи с этим были получены зависимости времени заряда конденсатора от различных параметров высоковольтной системы.

Рассмотрим зависимости времени заряда конденсатора до 100 кВ от напряжения источника питания для 5 значений емкости выходного конденсатора (рисунок 4), при фиксированном значении индуктивности накопителя энергии и длительности протекания импульса тока до момента обрыва (далее время обрыва $t_{обр}$).

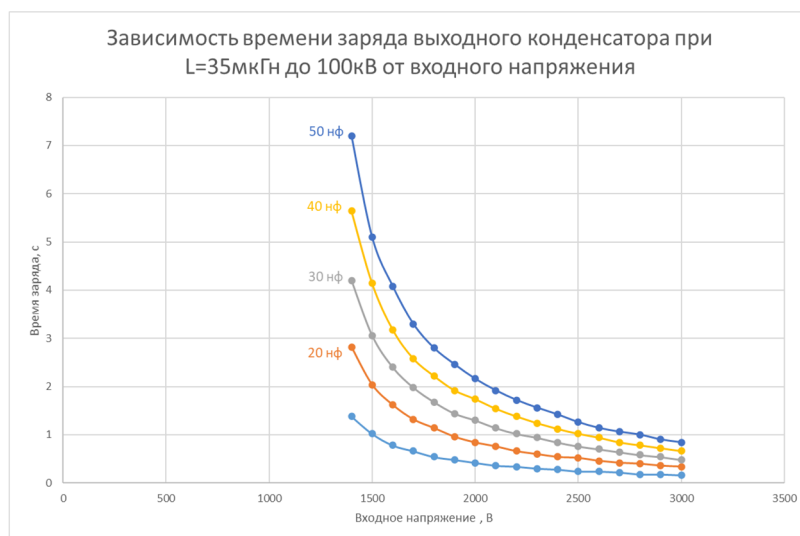


Рисунок 4 – Время заряда выходного конденсатора до 100 кВ от диапазона входного напряжения для 5 значений емкости нагрузочного конденсатора при фиксированном значении индуктивности 35 мкГн и времени протекания 12 мкс

Figure 4 – Dependence of charging time of output capacitor up to 100 kV from input voltage range for 5 values of load capacitor capacitance at fixed inductance of 35 μH and flow time of 12 μs

Из полученных зависимостей видно, что при значениях напряжения источника питания до 1,5 кВ время зарядки выходного конденсатора составляет несколько секунд. По мере увеличения напряжения источника питания время заряда сокращается, при входном напряжении $U_{ex} \geq 3$ кВ время заряда составляет менее секунды. Увеличение значения собственной емкости выходного конденсатора также приводит к пропорциональному увеличению времени заряда. Сокращение времени заряда выходного конденсатора при увеличении напряжения источника

питания обуславливается принципом работы газоразрядного коммутатора тока. Вместе с увеличением входного напряжения увеличивается максимальная величина пропускаемого тока через прибор, и при фиксированных значениях индуктивности накопителя и времени протекания импульса тока, увеличивается величина тока обрыва, что приводит к сокращению количества импульсов тока, необходимых для заряда конденсатора. В свою очередь увеличение емкости выходного конденсатора приводит к увеличению количества импульсов тока при прочих равных параметрах.

Величина тока обрыва зависит не только от величины входного напряжения, но и от индуктивности накопителя энергии, поскольку она определяет величину запасаемой энергии в колебательном контуре. Для определения влияния величины индуктивности накопителя на время заряда конденсатора были получены соответствующие зависимости (рисунок 5). Из графиков видно, что увеличение индуктивности более чем в 2,5 раза (с 35 мкГн до 100 мкГн) приводит к пропорциональному росту времени заряда более чем в 1,5 раза на всем исследуемом диапазоне. Запасаемая энергия магнитного поля в индуктивности накопителя определяется как $W_L = LI_{обр}^2/2$. Индуктивность вносит изменения в соотношение тока обрыва и времени обрыва. В свою очередь величина индуктивности задает максимальный протекаемый ток, поскольку входит в выражение для вычисления волнового сопротивления, а также определяет собственную частоту колебаний зарядного контура или максимально возможную длительность протекания тока. Увеличение индуктивности снижает максимальный ток и собственную частоту колебаний, т.е. осциллограмма тока через прибор становится менее крутой и более растянутой по оси времени. Изменение величины тока через коммутатор компенсируется изменением времени протекания. Величину индуктивности следует рассчитывать, исходя из заданных напряжения источника питания, амплитуды тока I_{max} и максимальной частоты генерируемых импульсов.

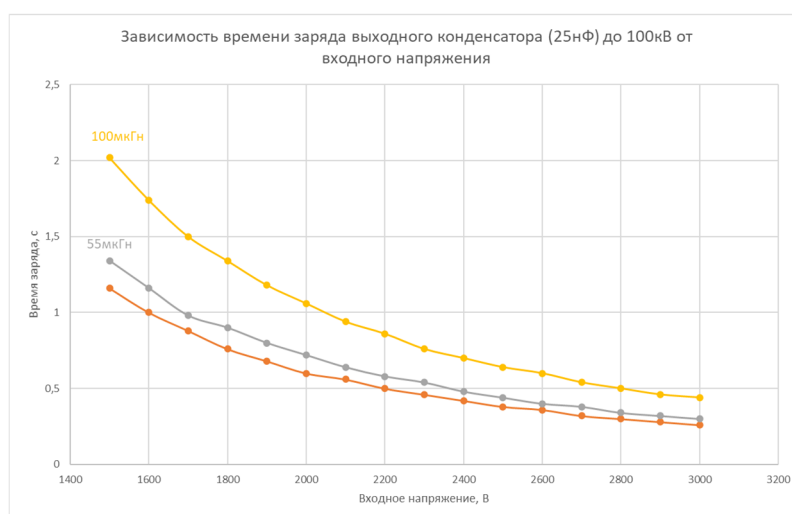


Рисунок 5 – Время заряда выходного конденсатора до 100 кВ от диапазона входного напряжения для 3 значений индуктивности при фиксированном значении выходной емкости (25 нФ) и времени протекания 12 мкс
Figure 5 – Dependence of charging time of output capacitor up to 100 kV from input voltage range for 3 inductance values at a fixed value of output capacitance (25 nF) and flow time of 12 μs

Как было отмечено ранее, еще одним из параметров, определяющих скорость заряда выходного конденсатора, является время обрыва тока, в коммутаторе. В заданных условиях эксперимента можно считать форму протекающего через прибор тока, изменяющейся по синусоидальному закону, так как максимальное время протекания тока будет равно половине периода собственных колебаний контура, что составит 34,4 мкс, и окажется в десятки раз меньше постоянной времени затухания, которая определяется внутренним сопротивлением накопительной индуктивности [9]. ЭДС самоиндукции будет определяться как $\varepsilon = -L \cdot di/dt \approx -L \cdot I_{обр}/t_{вык}$,

так как функция $i(t)$ на стадии выключения описывается линейной функцией, где $\varepsilon = U_a$ – амплитуда напряжения, формируемого на аноде коммутатора тока в момент выключения, $I_{обр}$ – величина обрываемого тока, $t_{вык}$ – время выключения коммутатора [9, 10]. Изменение момента возникновения самообрыва тока приводит к изменению величины обрываемого тока и, как следствие, напряжения заряда выходного конденсатора. Были получены зависимости времени заряда выходного конденсатора от времени обрыва тока (рисунок 6).

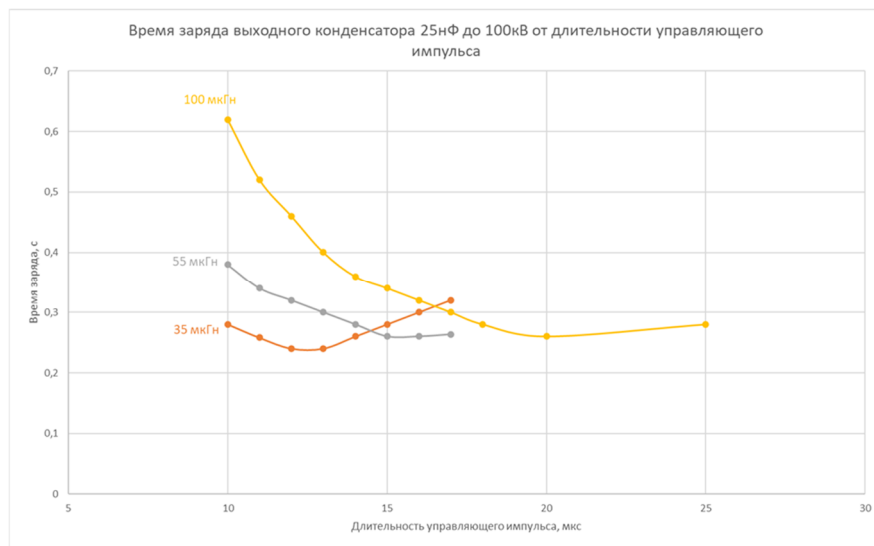


Рисунок 6 – Время заряда выходного конденсатора до 100 кВ от длительности протекания тока до момента обрыва для 3 значений индуктивности при фиксированном значении выходной емкости (25 нФ), и входном напряжении 3 кВ
Figure 6 – Dependence of charging time of output capacitor up to 100 kV on the duration of current flow to the moment of breakage for 3 inductance values at a fixed value of output capacitance (25 nF), and input voltage of 3 kV

С учетом графиков можно отметить следующие моменты: зависимости имеют явно выраженный минимум, при этом увеличение индуктивности накопителя приводит к смещению минимума зависимости в сторону увеличения времени заряда и смещению кривой в целом в сторону больших времен обрыва. Проводя количественный анализ, видим, что увеличение индуктивности в 3 раза (с 35 до 100 мкГн) приводит к увеличению времени заряда конденсатора более чем в 2 раза (с 280 до 620 мс). Наличие минимума характеристики на данных зависимостях обусловлено следующими причинами. При фиксированном значении индуктивности накопителя изменение величины $t_{обр}$ приводит к изменению величины обрываемого тока. Чем меньше время протекания тока через коммутатор до момента его самообрыва, тем меньше максимальный протекающий ток через прибор, и, как следствие $I_{обр}$, при этом запасается меньшее значение энергии в индуктивности, что приводит к увеличению количества необходимых импульсов тока для заряда емкости выходного конденсатора. Повышение значений времени заряда выходного конденсатора слева от точки минимума соответствует случаю самообрыва тока через прибор после прохождения максимума функции, во второй четверти периода синусоиды [11].

Справа от минимума время заряда возрастает с увеличением $t_{обр}$, что обусловлено схожими факторами, как и в первом случае, с той разницей, что здесь процесс обрыва тока через прибор происходит до прохождения максимума функции, в первой четверти периода синусоиды. Минимум характеристики соответствует моменту самообрыва тока, происходящему в максимуме протекающего через прибор, когда $I_{обр} = I_{max}$. Из приведенных характеристик следует, что значение накопительной индуктивности непосредственно определяет соотношение величины обрываемого тока и $t_{обр}$, величину накопленной энергии и скорость заряда выходного конденсатора. В данном случае диапазон рабочих значений индуктивности для высоковольтной системы находится в пределах 35-55 мкГн.

Работа данной высоковольтной системы в качестве контрольно-испытательного оборудования изоляторов и высоковольтных разрядников подразумевает под собой режим холостого хода, когда сопротивление нагрузки достигает значений 10^9 – 10^{11} Ом, тем самым выходной конденсатор и потенциальный тестируемый элемент с таким значением сопротивления будут образовывать RC-цепь с постоянной времени разряда конденсатора $\tau = C_{\text{вых}} R_n$, поэтому важную роль играет скорость заряда выходного конденсатора, поскольку необходимо, чтобы выходной конденсатор успевал полностью заряжаться до достижения этой величины. Помимо вышеописанных параметров, оказывающих влияние на данную характеристику, существенный вклад вносит еще один параметр – частота следования импульсов. В связи с этим были получены зависимости времени заряда выходного конденсатора от частоты следования импульсов (рисунок 7). Характер изменения зависимости показывает, что увеличение частоты следования приводит к значительному уменьшению времени заряда, при этом необходимо подбирать индуктивность накопителя в диапазоне 35–55 мкГн, потому как большее значение индуктивности вносит отрицательный характер в данный процесс, причины которого были описаны ранее.

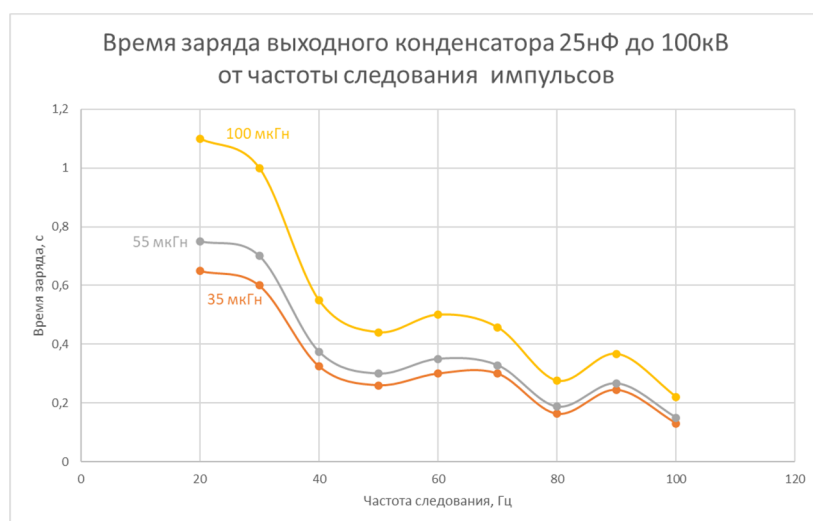


Рисунок 7 – Время заряда выходного конденсатора до 100 кВ от диапазона частот следования импульсов для 3 значений индуктивности при фиксированном значении выходной емкости (25 нФ), и входном напряжении 3000 В
Figure 7 – Dependence of charging time of the output capacitor up to 100 kV on pulse repetition frequency range for 3 inductance values at a fixed value of output capacitance (25 nF), and input voltage of 3000 V

Заключение

В статье продемонстрированы способы построения высоковольтных систем на основе генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ и газоразрядным коммутатором тока – два схемотехнических решения, которые могут успешно применяться в качестве контрольно-испытательного оборудования. На основе результатов компьютерного моделирования, были определены рабочие диапазоны значений величин для основных элементов схем: индуктивность накопителя энергии 35–55 мкГн, емкость выходного конденсатора 25–50 нФ, длительность протекания импульса тока до момента обрыва 10–15 мкс, напряжение источника питания $E_n \geq 2,5$ кВ, частота следования импульсов $f \geq 100$ Гц. Предложенные способы построения высоковольтных источников позволяют снизить массогабаритные показатели испытательного оборудования и повысить его надежность, за счет применения в качестве коммутирующего элемента прибора, способного восстанавливать свои свойства после срыва в работе газоразрядного коммутатора тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Бойко Н.И., Макогон А.В. Генератор по схеме Аркадьева – Маркса с покаскадным обострением фронта импульсов для обеззараживающей обработки пищевых продуктов // Электротехника и электромеханика. 2017. №4. С. 49-54.
2. Жерлицын А.Г., Канаев Г.Г. Гигаваттный генератор с разрядом индуктивного накопителя энергии // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 3. С. 44-46
3. Сerezhin А.А., Круглов С.А., Агальцов К.Д., Кусакин Д.С. Влияние конструктивных параметров сеточного узла газоразрядного коммутатора тока тиратронного типа на внутренний разогрев прибора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 206-211.
4. Kruglov S.A., Karabanov S.M., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Serezhin S.A., Suvorov D.V. Study of a gas-discharge current interrupter with a slotted configuration of holes in the grid node and improved discharge parameters in a high-voltage pulse generator with inductive energy storage // Proceedings of IEEEIC/I and CPS Europe. Italy. 2019.
5. Kruglov S.A., Karabanov S.M., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Zimin A.I., Suvorov D.V. Modeling and development of thyatron type grid node with improved discharge parameters for specialized gas-discharge current interrupter // Proceedings of IEEEIC/I and CPS Europe. Italy. 2018.
6. Kruglov S.A., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D. Modeling and development of grid node with slotted hole configuration and extended charge parameters for specialized gas discharged current breaker // IEEE Int. Conf. (Electro-2018), May 2018, Proceedings 12th Int. Conf. Electro-2018 Czech Republic. 2018.
7. Маханько Д.С. Электрическая прочность конструкции неуправляемого разрядника-обострителя на напряжение до 500 кВ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 188-197.
8. Сerezhin А.А., Круглов С.А., Агальцов К.Д., Кусакин Д.С. Анализ переходных процессов с учетом потерь в газоразрядном коммутаторе тока с секторальным отверстием в экране // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 200-205.
9. Круглов С.А. Газоразрядные коммутаторы тока в схеме с индуктивным накопителем энергии: дис. д-ра техн. наук. Рязань. 2021.
10. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сerezhin А.А., Майсурадзе А.И. Энергетические характеристики процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 35. С. 98-102.
11. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сerezhin А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д., Павлов М.Б. Газоразрядные прерыватели тока низкого давления в генераторе высоковольтных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии // ПТЭ. 2017. № 6. С. 811-817.

UDC 615.472.03.615.847.8

CONSTRUCTION OF HIGH-VOLTAGE POWER SYSTEMS BASED ON INDUCTIVE ENERGY STORAGE AND GAS-DISCHARGE CURRENT INTERRUPTER

S. A. Kruglov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department of Industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5992-7319, e-mail: pel.rgrtu@yandex.ru

A. A. Serezhin, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru

D. S. Kusakin, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, Department of Industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-1596-2136, e-mail: kusakinds@yandex.ru

The problem of constructing power systems based on high-voltage pulse generator with inductive energy storage device that can be used as control and testing systems for high-voltage equipment is considered. The

aim of the work is to build a new type of high-voltage pulsed voltage generators using a combined type of energy storage. Two methods of constructing high-voltage systems are considered (with high-voltage electronic valve connected to load capacitor, and using pulse transformer). Based on the results of computer modeling, the operating ranges of values for the main elements of the circuits have been determined.

Keywords: high-voltage pulse generator, inductive energy storage, gas-discharge current interrupter, output capacitor charging time, current interruption time, high-voltage system.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-135-143

References

1. **Boyko N.I., Makogon A.V.** Generator po skheme Arkad'eva – Marksa s pokaskadnym obostreniem fronta impul'sov dlya obezzarazhivayushchej obrabotki pishchevyh produktov. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2017, no.4, pp. 49-54. (in Russian).
2. **Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G.** Gigavattnyj generator s razryadom induktivnogo nakopitelya energii. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2013, no. 3, pp. 44-46. (in Russian).
3. **Serezhin A.A., Kruglov S.A., Agaltsov K.D., Kusakin D.S.** Vliyanie konstruktivnyh parametrov setochnogo uzla gazorazryadnogo kommutatora toka tiratronnogo tipa na vnutrennij razogrev pribora. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 80, pp. 206-211. (in Russian).
4. **Kruglov S.A., Karabanov S.M., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Serezhin S.A., Suvorov D.V.** Study of a gas-discharge current interrupter with a slotted configuration of holes in the grid node and improved discharge parameters in a high-voltage pulse generator with inductive energy storage. *Proceedings of IEEEIC/I and CPS Europe*. Italy. 2019.
5. **Kruglov S.A., Karabanov S.M., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Zimin A.I., Suvorov D.V.** Modeling and development of thyatron type grid node with improved discharge parameters for specialized gas-discharge current interrupter. *Proceedings of IEEEIC/I and CPS Europe*. Italy. 2018.
6. **Kruglov S.A., Vereschagin N.M., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D.** Modeling and development of grid node with slotted hole configuration and extended charge parameters for specialized gas discharged current breaker. *IEEE Int. Conf. (Electro-2018)*. May 2018, Proceedngs 12th Int. Conf. Electro-2018 Czech Republic. 2018.
7. **Makhanko D.S.** Elektricheskaya prochnost' konstrukcii neupravlyaemogo razryadnika-obostritelya na napryazhenie do 500 kV. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 78, pp. 188-197. (in Russian).
8. **Serezhin A.A., Kruglov S.A., Agaltsov K.D., Kusakin D.S.** Analiz perekhodnyh processov s uchetom poter' v gazorazryadnom kommutatore toka s sektoral'nym otverstiem v ekrane. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 80, pp. 200-205. (in Russian).
9. **Kruglov S. A.** Gazorazryadnye kommutatory toka v skheme s induktivnym nakopitelem energii: dis. d-ra tekhn. nauk. Ryazan. 2021. (in Russian).
10. **Vereshchagin N.M., Kruglov S.A., Serezhin A.A., Majsuradze A.I.** Energeticheskie karakteristiki processa preryvaniya toka gazorazryadnym kommutatorom v generatore moshchnykh nanosekundnyh impul'sov s induktivnym nakopitelem energii. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2011. no. 80, pp. 98-102. (in Russian).
11. **Vereshchagin N.M., Kruglov S.A., Serezhin A.A., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Pavlov M.B.** Gazorazryadnye preryvateli toka nizkogo davleniya v generatore vysokovol'tnykh nanosekundnyh impul'sov s induktivnym nakopitelem energii. *PTE*. 2017, no.6, pp. 811-817. (in Russian).