

Модернизация управления включением контуров двухконтурного генератора импульсных токов

А. Д. Блащенко, Е. П. Разменов, И. Н. Старков^{*,**}

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина,*

**e-mail: dpte@iipt.com.ua, **e-mail: iipt@iipt.com.ua*

Поступила в редакцию 04.06.2021

После доработки 01.09.2021

Принята к публикации 03.09.2021

Показана возможность разработки устройств управления включением контуров двухконтурных генераторов импульсных токов в различных разрядно-импульсных технологиях. Описаны преимущества использования таких устройств в технологии высоковольтного электрохимического взрыва, которая нуждается в специфическом энергоотводе, основанном на временных задержках между включениями контуров. Предложена схема автоматического запуска второго контура в двухконтурном генераторе импульсных токов, которая обеспечивает плавную (не дискретную) регулировку временной задержки срабатывания и реализует более широкий диапазон времен задержки.

Ключевые слова: разрядно-импульсные технологии, двухконтурный генератор импульсных токов, линия задержки, экспериментальный стенд, блок задержанных импульсов

УДК 621.319.5

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.93>

ВВЕДЕНИЕ

Разрядно-импульсные технологии (РИТ) на основе электровзрыва в конденсированной среде (воде) уже давно нашли широкое применение в промышленности [1, 2]. Вполне естественно, что имеющая место тенденция непрерывного повышения энергоемкости электрогидроимпульсных установок на базе подводного электровзрыва в совокупности с ограниченными энергетическими и ресурсными показателями электрических конденсаторов, применяемых в качестве накопителей энергии, обусловила поиск новых импульсных энергоисточников. Решением стало объединение традиционного электровзрыва в воде и взрыва химических конденсированных составов. Электровзрыв в химически активных средах, так называемый высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) [3], позволяет эффективно сочетать достоинства, присущие экзотермическим составам (ЭС) (высокая удельная энергоемкость) и традиционному электровзрыву в жидких средах (возможность гибкого, динамичного, программируемого управления [4, 5]). Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины занимается разработкой, развитием и усовершенствованием РИТ на основе таких видов преобразования энергии.

Анализ результатов ранее проведенных исследований [3, 6] показывает, что каждая отдельная РИТ, в том числе и с использованием

ВЭХВ, требует своего, присущего только этой технологии закона ввода энергии в плазменный канал разрядного промежутка. Большинство применяемых РИТ используют простой закон ввода энергии в канал разряда, определяемый разрядом емкостного накопителя на водный промежуток, при котором реализуется импульс давления с крутым передним фронтом и спадом, близким к экспоненциальному. Для некоторых же технологий (например, запрессовка труб в трубных решетках, штамповка, калибровка деталей) требуется закон ввода энергии более сложный, обеспечивающий, например, многопульсационный профиль импульса давления, который должен быть реализован путем соответствующего управления вводом энергии в плазменный канал в процессе разряда.

Одной из возможностей получить заданный закон энергоотвода в плазменный канал является реализация нелинейно-параметрической схемы генератора импульсных токов (ГИТ) [7–9]. Более перспективным является использование многоконтурных емкостных ГИТ с определенными по времени моментами включения каждого из последующих контуров с помощью высоковольтной коммутационной аппаратуры. Это позволит генерировать разнообразные по форме и амплитуде импульсы тока в канале разряда и соответствующий профиль импульса давления в зоне обработки.

МЕТОДИКА

Рассмотрение технической реализации известных РИТ на базе ВЭХВ показало, что до настоящего времени в них применяется традиционная схема ГИС при использовании емкостного накопителя энергии [1]. При этом управление силовыми характеристиками осуществляется предварительным выбором начальных условий ВЭХВ (параметров ГИС, длины разрядного промежутка, выбором используемых ЭС, что вводятся в разрядный промежуток, подбором их массы).

При полном сгорании массы ЭС, введенной в разрядный промежуток, величина высвобождаемой при ВЭХВ химической энергии должна быть близкой к потенциальной энергии ЭС. Однако полного сгорания таких гетерогенных сред, как ЭС, содержащих алюминий, в канале ВЭХВ не наблюдается. Так, при ВЭХВ по традиционной схеме ГИТ ЭС, содержащий 40% весового алюминия в виде порошка ПА-4 и пудры ПАП-2, в реакцию вступает в лучшем случае около 20% общего его количества, введенного в разрядный промежуток. Основной причиной этого является прекращение экзотермической самоподдерживающейся реакции из-за резкого (в течение порядка 10^{-5} с) снижения давления в канале ВЭХВ от сотен МПа до менее чем 23 МПа – минимального уровня давления, необходимого для протекания экзотермической самоподдерживающейся реакции [10]. Следовательно, для повышения эффективности высвобождения химической энергии ЭС необходима поддержка уровня давления в канале ВЭХВ выше минимального более длительное время, чтобы протекающий разрядный ток разогрел среду и отдельные частицы горючего алюминия до температуры воспламенения, после чего начинаются экзотермические реакции с выделением дополнительной тепловой энергии в разрядный канал.

На основании анализа физических процессов, протекающих при ВЭХВ, был предложен новый метод повышения эффективности экзотермических преобразований при реализации ВЭХВ, основанный на последовательном порционном введении электрической энергии в канал ВЭХВ, на базе применения управляемых ГИС [10]. Иницирующий импульс высокого напряжения с предварительно определенной энергией подается в виде двух последовательных импульсов с различной величиной соотношения между энергиями и в разные временные интервалы между импульсами, в результате чего повышается эффективность высвобождения химической

энергии ЭС за счет увеличения полноты сгорания.

Суть процесса представляется следующим образом: в ЭС, помещенном в водный разрядный промежуток, после первого высоковольтного импульса возникает высоковольтный пробой с образованием каналов сквозной проводимости. Поскольку ЭС представляет собой не сплошную среду, а систему микрочастиц алюминия, разделенных водным раствором окислителя, и имеет определенную электрическую прочность, разрядный ток в зоне ЭС протекает по ограниченному количеству узких каналов проводимости, которые формируются в результате электрического пробоя. Поэтому величина зарядного напряжения первого накопителя выбирается из условий обеспечения начальной напряженности электрического поля, равной критической, при которой эффективность сгорания выбранного ЭС максимальная за счет густой сети образовавшихся каналов проводимости. Так как электрическая энергия будет выделяться в основном в этих каналах, то их число в первом приближении определяет количество ЭС, вовлеченного в высокотемпературную зону экзотермических преобразований. Именно в них будет происходить разогрев ЭС до температуры зажигания, после чего начнутся экзотермические химические реакции с выделением дополнительной тепловой энергии в плазменный канал.

Затем с разным временем задержки относительно первого импульса будет подаваться второй высоковольтный импульс, энергия в импульсе которого в несколько раз больше по сравнению с энергией первого импульса.

Энергия второго импульса будет выделяться в уже образованный и развивающийся разрядный канал ВЭХВ, при этом создавая определенный профиль давления в канале ВЭХВ, что является благоприятным условием для протекания самоподдерживающейся экзотермической реакции ЭС. В результате можно ожидать увеличения высвобождаемой при этом тепловой энергии и, как следствие, рост суммарной выделившейся энергии по сравнению с режимами традиционных одноконтурных электроразрядных установок [8, 10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки такого подхода был создан специализированный экспериментальный стенд, основой которого является двухконтурный ГИТ [11] (рис. 1).

Идея исследований заключалась в том, что иницирующий импульс высокого напряжения с

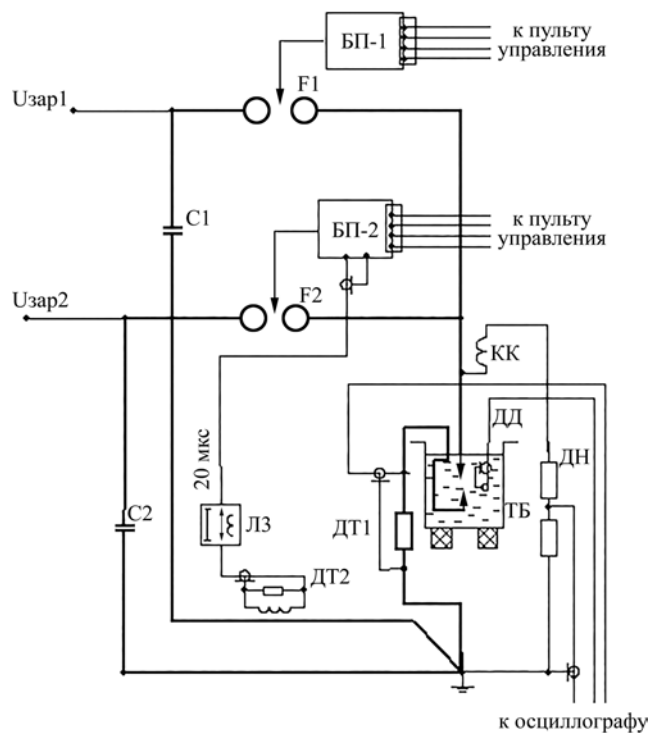


Рис. 1. Фрагмент схемы стенда.

предварительно заданной энергией подают как два последовательных импульса с разной величиной энергии и с заданным временным интервалом между импульсами.

Таким образом, емкостные накопители каждого контура могут иметь разные емкости и запасаемую энергию, заряжаться до различного напряжения, тем самым обеспечивать требуемые временные зависимости тока и напряжения на нагрузке. В то же время должно быть обеспечено стабильное (от разряда к разряду) включение второго контура в заданный момент времени по отношению к началу процесса.

Основной задачей, которая решалась при создании данного стенда, являлось обеспечение автоматической временной задержки включения второго контура относительно первого. При этом величина задержки должна быть регулируемой.

Отправной точкой отсчета для формирования импульса запуска блока поджига второго контура (БП-2) можно принять начало работы (фронт тока) первого контура. При этом на индуктивном элементе может быть сформирован импульс напряжения, достаточный по величине для запуска БП-2 и соответственно разрядника F2. В качестве элемента, способного сформировать такой импульс напряжения, было предложено использовать пояс Роговского по схеме RL-интегрирования, смонтированный на токоподводе первого контура. Для обеспечения требуемой временной задержки срабатывания второго контура была применена линия задержки (ЛЗ).

В статье [11] приведен обширный объем информации о ЛЗ, схема и принцип действия, методика расчета, области использования и реализуемый временной диапазон, возможность использования ЛЗ промышленного исполнения в рассматриваемых исследованиях. Как показал анализ этой информации, использование ЛЗ промышленного исполнения в низкоомных цепях, как в рассматриваемом схемном случае, где выход пояса Роговского и цепь управления силового тиристора блока поджига являются низкоомными, оказалось невозможным. При попытке использования их в данном стенде потребовалось применение дополнительных электронных согласующих устройств, усиливающих сигнал по току, что существенно ухудшило временную стабильность цепи ЛЗ и стабильность работы стенда в целом, так как уровень сигнала в цепи запуска блока поджига БП-2 был соизмерим с уровнем электромагнитных помех, возникающих при работе первого контура. В этой связи была создана ЛЗ с низкоомным входным сопротивлением, состоящая из 10 последовательно соединенных П-образных фильтров нижних частот с временем задержки каждой ступени $t_3 = 2,0$ мкс. Амплитуда передаваемого импульса напряжения – до 40 В. Характеристическое сопротивление созданной ЛЗ – $Z_{ЛЗ} = 4,7$ Ом.

Проведенные ранее экспериментальные исследования позволили утверждать, что предложенная схема автоматического запуска второго контура в двухконтурном ГИТ обеспечивает достаточно точную (для технологи-

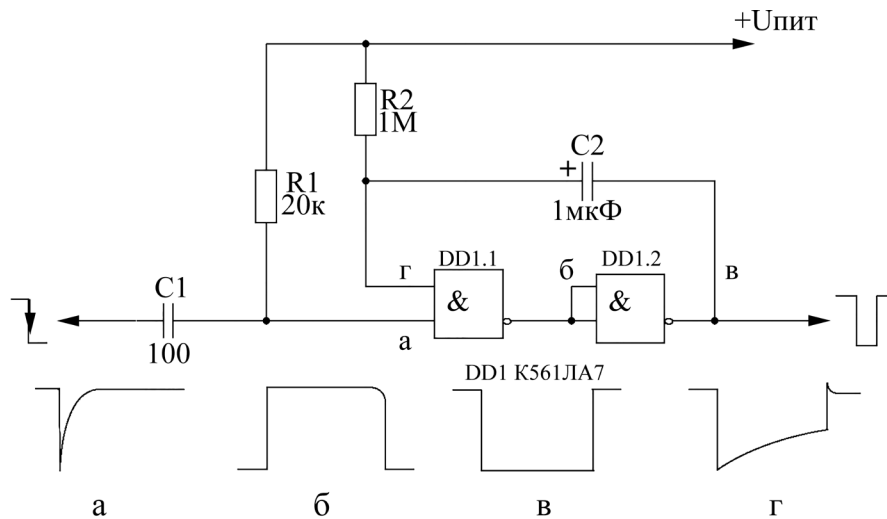


Рис. 2. Схема одновибратора и временные эпюры напряжений в характерных точках.

ческих устройств на основе электровзрыва в воде) длительность задержки срабатывания второго контура, что позволило формировать в разрядном промежутке ток требуемой конфигурации, обеспечивающий необходимый профиль волны давления в зоне обработки.

В то же время исследование, проводимые в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины и направленные на разработку, развитие и усовершенствование РИТ на основе ВЭХВ, потребовали обеспечения плавной (не дискретной) регулировки временной задержки срабатывания второго контура и реализации существенно более длинного (порядка сотен микросекунд) максимального времени задержки. Такие требования используемая в исследованиях ЛЗ [11] выполнять не способна.

Реализовать устройство, способное удовлетворять указанным требованиям, можно только с помощью электронной схемотехники. Было проанализировано и опробовано несколько вариантов схемных решений (цифровых и аналоговых) [12–15]. Принято решение использовать схему ждущего мультивибратора (одновибратора) на элементах И – НЕ, запускаемого короткими импульсами отрицательной полярности (рис. 2).

В исходном состоянии конденсатор $C2$ разряжен. При этом на обоих входах элемента $DD1.1$ и на выходе элемента $DD1.2$ находится высокий уровень напряжения (рис. 2, эпюры а, в, г.) При поступлении с выхода дифференцирующей цепочки короткого импульса отрицательной полярности (эюра а) элемент $DD1.1$ выключается и на его выходе появляется высокий уровень напряжения (эюра б).

На выходе элемента $DD1.2$ появляется низкий уровень (эюра г), который через конденсатор $C2$ передается на вход элемента $DD1.1$ и поддерживает его в выключенном состоянии.

Конденсатор $C2$ начинает заряжаться током через резистор $R2$ от нуля до напряжения питания. Когда напряжение на левой по схеме обкладке конденсатора $C2$ достигнет порога включения, элемент $DD1.1$ включится (эюра б), на выходе элемента $DD1.2$ напряжение начнет повышаться, это повышение, передаваясь через $C2$ на вход $DD1.1$, вызовет лавинообразный процесс переключения обоих элементов. Одновибратор вернется в исходное состояние.

Времязадающими элементами одновибратора являются резистор $R2$ и конденсатор $C2$. Изменяя их, на выходе (эюра г) можно получить импульс различной длительности, а следовательно, различную задержку заднего фронта импульса по отношению к входному сигналу.

На основании рассмотренной схемы был разработан блок задержки импульсов (БЗИ) (рис. 3), состоящий из следующих частей:

- схема формирования времени задержки;
- выходной каскад;
- блок питания.

Одновибратор собран на элементах $DD1.1$ и $DD1.2$. Время задержки устанавливается дискретно с помощью набора постоянных резисторов $R3, R9, R10, R11$ и конденсаторов $C2$ и $C3$. В пределах каждого поддиапазона задержку можно менять плавно переменным резистором $R2$. Минимальное время задержки ($BK2$ – в положении 1, $BK1$ – разомкнут) составляет около 2 мкс. Максимальное время задержки ($BK2$ – в положении 5, $BK1$ – замкнут) – около 290 мкс. В указанных пределах можно установить любую задержку. Входная цепь образована дифференциальной цепочкой $C1-R1$. $VD1$ – двусторонний стабилитрон для защиты микросхемы от перенапряжения по входу, $VD2$ – защита от положительных входных импульсов.

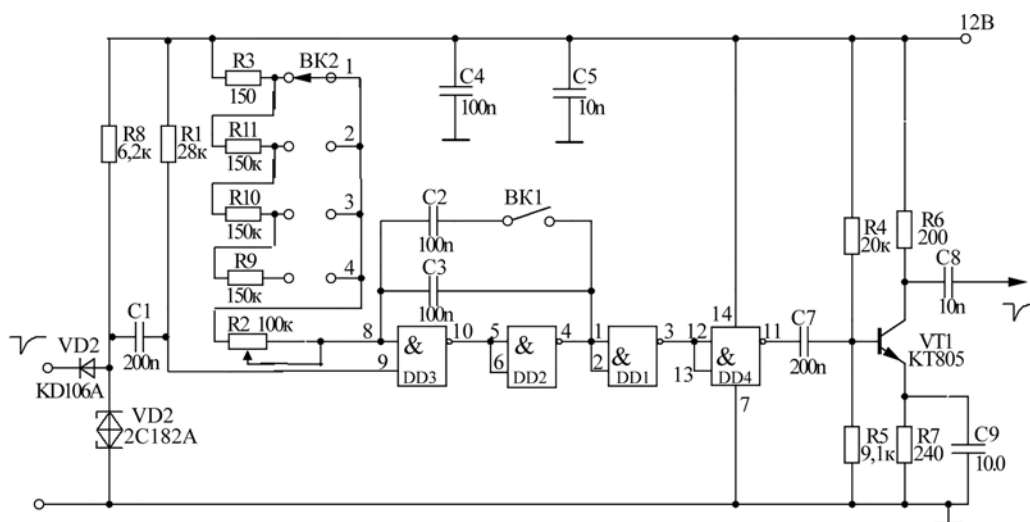


Рис. 3. Схема формирования времени задержки.

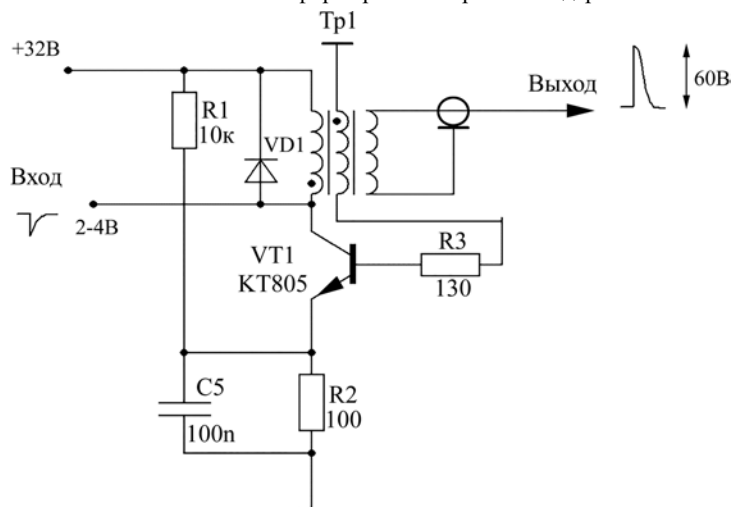


Рис. 4. Выходной каскад.

Элементы DD1.1, DD1.4 исключают влияние нагрузки на работу одновибратора. Положительный импульс поступает на вход усилителя-формирователя, собранного на транзисторе KT805 и далее на выходной каскад.

Выходной каскад (рис. 4) собран по схеме ждущего блокинг-генератора. При поступлении отрицательного импульса на коллектор транзистора VT1 генератор выдает мощный положительный импульс амплитудой 60 В, который запускает блок поджига соответствующего канала экспериментального стенда.

Работа блока питания (рис. 5) обеспечивается двумя стабилизаторами напряжения на основе общеизвестных схем при напряжении питания 12 и 32 В. Лампочка Л1 является индикатором подачи питания на устройство.

Конструктивно блок задержки импульсов выполнен в металлическом корпусе с габаритами 280×75×150 мм. Выключатель питания BK1 и предохранитель Пр1 размещены на задней стенке блока. На передней панели находятся индикаторная лампочка, переключатели BK1, BK2, переменный резистор R2, входной и выходной разъемы.

Наладка макета созданного БЗИ осуществлялась с помощью генератора сигналов специальной формы Г6-28 и двухлучевого осциллографа С1-55.

В исходном состоянии осциллограф находится в ждущем режиме. Сигнал с генератора амплитудой 6–10 В в виде меандра одновременно поступает на вход БЗИ, на первый канал осциллографа и на вход синхронизации осциллографа. Осциллограф и БЗИ запускаются отрицательным перепадом меандра. С выхода БЗИ задержанный сигнал поступает на второй вход осциллографа. Манипулируя переключателями BK1, BK2 и переменным резистором R2, по осциллограммам можно оценить величину времени задержки. Время задержки измерялось между моментом запуска развертки осциллографа и передним фронтом выходного импульса. Минимальная задержка равна 2 мкс, максимальная – около 280 мкс. В указанном диапазоне можно выставить любое требуемое значение времени задержки.

Экспериментальная проверка двухконтурной установки с разработанной схемой автомати-

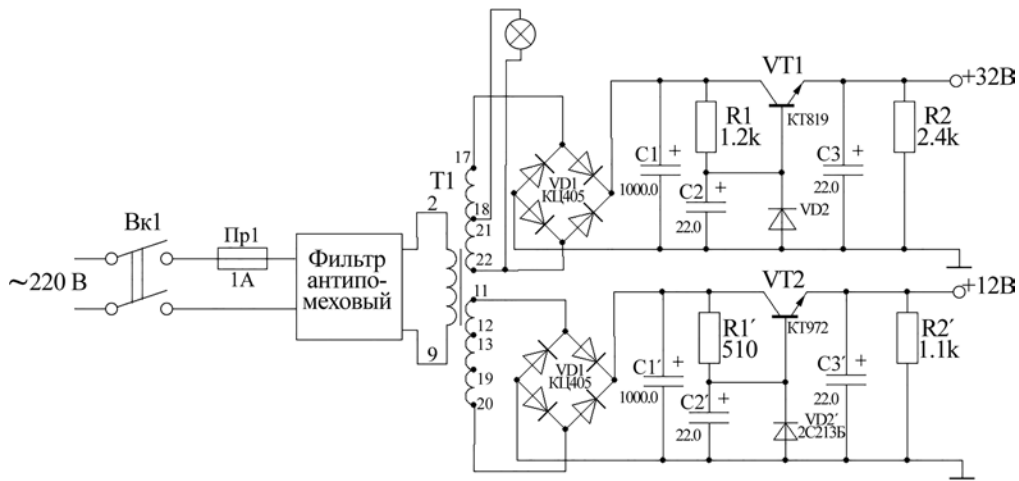


Рис. 5. Блок питания.

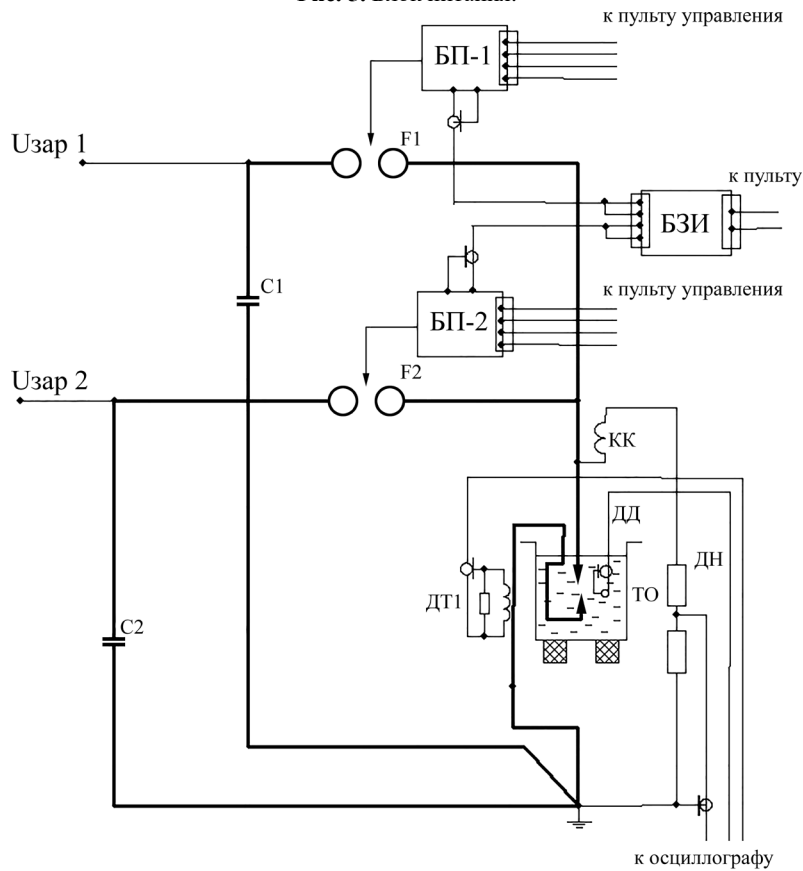


Рис. 6. Схема стенда с использованием БЗИ.

ческого запуска второго контура на основе БЗИ проводилась в режиме короткого замыкания, при разрядах в водной среде и при ВЭХВ. Измерительная система стенда выполнена в соответствии с рекомендациями [11].

Алгоритм включения двухконтурного ГИТ сводился к следующему: с пульта управления запускается блок поджига БП-1 первого контура, который включает разрядник F1. В первом контуре и при нагрузке возникает ток. Одновременно синхриимпульс с БП-1 запускает БЗИ, который через время установленной задержки запускает БП-2 и соответственно разрядник F2 второго контура. При нагрузке появляется ток второго контура (рис. 6).

Для проверки изменения времени задержки обеспечивался заряд накопителя только первого контура. Дополнительным делителем напряжения на осциллографе фиксировался импульс напряжения на выходе БП-2, а точнее, – на управляющем электроде разрядника второго контура F2, что позволяло с достаточно высокой точностью определять время задержки срабатывания второго разрядника относительно момента включения ГИТ. При этом для каждого положения переключателей ВК1 и ВК2 определялся диапазон плавной регулировки времени задержки посредством переменного резистора R2. Результаты представлены в таблице.

Таблица. Время задержки выходного импульса с БП-2

Положение ВК2	«1»		«2»		«3»		«4»		«5»	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Плавная регулировка										
ВК1 выключен, мкс	2,4	22,8	33,2	52,8	62,4	82,4	92,0	113,0	123,0	143,0
ВК1 включен, мкс	4,2	43,6	66,0	106,0	128,0	168,0	190,0	230,0	253,0	293,0

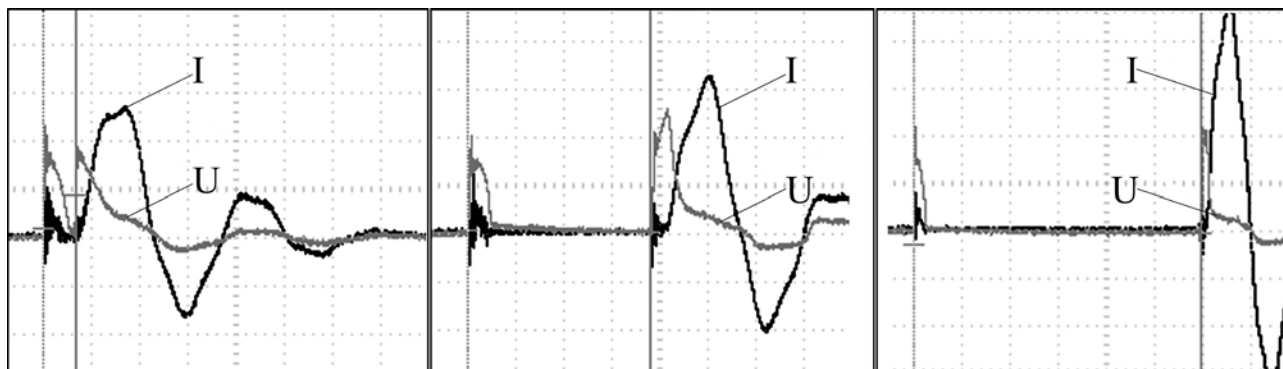


Рис. 7. Характерные осциллограммы тока и напряжения на нагрузке при ВЭХВ.

ВЫВОДЫ

Для демонстрации работы двухконтурного ГИТ с БЗИ приведены результаты одного из экспериментов с ВЭХВ. Суть эксперимента сводится к тому, что в межэлектродный разрядный промежуток ГИТ устанавливается тонкая, внутренним диаметром 2,5 мм, диэлектрическая капсула, заполненная 40% алюминий-содержащим ЭС – 0,3 г. При этом формируется межэлектродный промежуток длиной 30 мм. Первый, малоэнергетичный контур предназначен для создания маломощных иницирующих плазменных каналов, в которые через время задержки поступает энергия более мощного второго контура. При этом фиксировались временные зависимости тока, напряжения, импульса давления и периода пульсации парогозовой полости. Параметры схемы были следующими: для первого контура зарядное напряжение $U_1 = 30$ кВ, емкость конденсатора $C_1 = 0,5$ мкФ, индуктивность контура $L_1 = 7$ мкГн, энергия первого контура составляла $W_1 = 22,5$ Дж; для второго контура зарядное напряжение $U_2 = 26,5$ кВ, емкость конденсатора $C_2 = 2,24$ мкФ, индуктивность контура $L_2 = 3,5$ мкГн, энергия второго контура $W_2 = 786,5$ Дж. В результате чего суммарная энергия двух контуров составляла $W_{\text{сум}} = 800$ Дж. Эксперименты проводились с широким диапазоном временных задержек включения второго контура, результаты фиксировались осциллографом (рис. 7).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволяют утверждать, что предложенная схема блока задержки

импульсов способна реализовать в двухконтурном ГИТ автоматический запуск второго контура с достаточно точной (для технологических устройств) установкой времени задержки срабатывания второго контура в диапазоне от 2 до 300 мкс. Это, в свою очередь, позволяет формировать в разрядном промежутке ток требуемой конфигурации, обеспечивающий эффективное электрохимическое преобразование энергии, что в итоге способствует формированию необходимого для рассматриваемой РИТ профиля волны давления в зоне обработки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*, Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Гулый, Г.А., *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта*, М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
3. Вовченко, А.И., *Высоковольтные электро-разрядные системы с управляемым преобразованием энергии*, Дис. докт. техн. наук, Николаев, 2002. 378 с.
4. Kozurev, S.S., Control system of discharge-pulse installation with elements of artificial intelligence, *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019, Lviv, Ukraine, July 2–6, 2019. Proceedings 8879816*, p. 513.

5. Ovchinnikova, L.E., Kozyrev, S.S., Efficiency enhancement for discharge-pulse processing by adaptive control based on fuzzy models, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 4, p. 332.
6. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*, Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
7. Вовченко, А.И., Дивак, Н.П., Тертилов, Р.В., Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них, *Техн. электродинамика*, 2009, № 6, с. 54.
8. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*, Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
9. Вовченко, А.И., Поздеев, В.А., Штомпель, И.В., Параметры подводного электрического разряда в условиях сложного энерговода, *Техн. электродинамика*, 1985, № 3, с. 30.
10. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Блащенко, А.Д., Старков, И.Н., Повышение эффективности высоковольтных электро-разрядных установок, использующих экзотермические дисперсные среды, *Техн. Электродинамика*, 2019. № 5, с. 77.
11. Блащенко, А.Д., Половинка, В.Д., Тертилов, Р.Д., Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 1, с. 97.
12. Жека, А.А., Батушкина, Т.В., *200 практических схем генераторов*, Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1987. 312 с.
13. Зубчук, В.И., Сигорский, В.П., Шкуро, А.И., *Справочник по цифровой схемотехнике*, Киев: Техника, 1990. 448 с.
14. Фролов, В.А., *Электронная техника. Ч. 2. Схемотехника электронных схем*, М.: УМЦ ЖДТ, 2015. 609с.
15. Кругликов, А.П., *Устройство формирования управляющих импульсов*, АС СССР № 354538, 1972. Бюл. № 30, 2 с.

Summary

A possibility of developing control devices for switching on circuits in double-circuit pulse current generators in various discharge-pulse technologies is shown. The advantages of using those devices in the technology of a high-voltage electrochemical explosion are described, which requires a specific energy input based on the time delays between switching on the circuits. A scheme is proposed for automatically starting the second circuit in a double-circuit pulse current generator, which provides smooth (non-discrete) adjustment of the time delay of operation and realizing a wider range of delay times.

Keywords: discharge-pulse technologies, double-circuit pulse current generator, delay line, experimental stand, block of delayed pulses