

Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров

А. Д. Блащенко, В. Д. Половинка, Р. В. Тертилов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpte@iipt.com.ua*

Показана необходимость в разработке многоконтурных генераторов импульсных токов с регулируемым включением по времени каждого из контуров применительно к разрядно-импульсным технологиям, требующим использования сложного профиля волны давления в зоне обработки. Предложена, создана и исследована схема автоматического запуска второго контура в высоковольтном двухконтурном генераторе импульсных токов, обладающая высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и обеспечивающая достаточно точную (для технологических устройств) регулируемую длительность задержки срабатывания второго контура. Подтверждена возможность формирования сложного импульса тока, регулируемого по времени и амплитуде.

УДК 621.319.5

В настоящее время проблема разработки управляемых технологий на основе процессов взрывного выделения энергии весьма актуальна, поскольку это связано с расширением их области применения и повышением эффективности использования взрывной энергии. Она сохраняет свою актуальность и для разрядно-импульсных технологий (использующих электрогидравлический эффект взрывного выделения энергии), нашедших широкое распространение в промышленности [1, 2]. Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины занимается разработкой, развитием и усовершенствованием таких технологий.

Анализ результатов ранее проведенных исследований [3, 4] показывает, что каждая разрядно-импульсная технология (РИТ) нуждается в своем, присущем только этой технологии, законе ввода энергии в плазменный канал разрядного промежутка. Большинство применяемых РИТ используют простой закон ввода энергии емкостного накопителя в плазменный канал разряда, образованный высоковольтным электрическим пробоем водного промежутка. При этом формируется импульс давления с крутым передним фронтом и спадом, близким к экспоненциальному. Но для ряда технологий (например, запрессовка труб в трубные решетки, штамповка и калибровка деталей) требуется более сложный закон ввода энергии, обеспечивающий, в частности, многопульсационный профиль волны давления.

Одна из просто реализуемых возможностей получить сложный, заранее запрограммированный закон энерговвода в плазменный канал, а значит, и соответствующий профиль импульса

давления в технологической зоне заключается в изменении электрических параметров R , L , C импульсного генератора непосредственно в процессе разряда [3, 5, 6]. При этом только один из параметров контура R , L , C (с помощью внешнего воздействия) изменяется по заранее заданному временному закону. Более перспективным является управление характеристиками подводного электровзрыва с помощью многоконтурных емкостных ГИТ с определенными по времени моментами включения каждого из последующих контуров, которые позволяют генерировать разнообразные по форме и амплитуде импульсы тока в канале разряда и формировать соответствующий профиль импульса давления в зоне обработки.

В общем случае емкостные накопители каждого контура могут иметь разные емкости, заряжаться до различного зарядного напряжения и от разных зарядных устройств. Кроме того, каждый разрядный контур должен обеспечивать требуемые временные зависимости тока и напряжения на нагрузке. При этом должно быть согласованное и стабильное (от разряда к разряду) включение каждого последующего контура в заданный момент времени по отношению к началу процесса. Несомненно, что приведенные выше условия работы многоконтурной схемы в случае инициируемого разряда, обеспечивающего предельно высокую стабильность пробоя, достаточно легко могут быть реализованы приборными способами. В большинстве РИТ используется высоковольтный пробой водного промежутка с его нестабильностью и стохастичностью параметров разряда. На пути создания многоконтурного ГИТ для рассматриваемых условий с автоматическим

включением контуров от начала процесса разряда в настоящей работе ставится цель реализовать и исследовать его двухконтурную схему.

Для этого был создан специализированный экспериментальный стенд, основой которого является двухконтурный ГИТ (рис. 1).

Силовая часть стенда, обеспечивающая заряд накопителей обоих контуров, включает высоковольтный трансформатор-выпрямитель ВТМ-15/50 (ВТМ), обеспечивающий выпрямленное напряжение до 50 кВ при выделяемой на нагрузку мощности до 15 кВт. Регулирование высокого напряжения выполняется по первичной цепи с помощью трехфазного трансформаторного регулятора РТТ-25/05, управление которым осуществляется с пульта управления. ВТМ применяется для заряда емкостного накопителя С1, состоящего из одного или двух импульсных конденсаторов типа ИКМ-50×3 и накопителя С2, включающего конденсаторы типа ИК-50×1. Использование в схеме электроразъединителя (ЭР) позволяет заряжать накопители от одного ВТМ до разных зарядных напряжений. Зарядное напряжение контролируется киловольтметрами (кV1) типа С-196 (до 35 кВ) и (кV2) типа С-100 (до 75 кВ), имеющих класс точности ±1% и ±2% соответственно.

Технологический объем (ТО) представляет собой металлический бак кубической формы (ребро куба – 1 м), заполненный водой, в котором расположена коаксиальная электродная система (типа острие-острие или острие-плоскость).

Высоковольтный (положительный) электрод электродной системы подключается к накопителям первого или второго контура через соответствующие управляемые воздушные разрядники тригatronного типа – QF1 и QF2, имеющие широкий диапазон рабочего напряжения без перенастройки (20–50) кВ. Запуск разрядников производится соответствующими блоками поджига – БП-1 и БП-2, представляющими собой маломощные высоковольтные импульсные генераторы, управление которыми в общем случае осуществляется с пульта управления.

Нагрузкой для такого двухконтурного генератора является нелинейное активное сопротивление плазменного канала электрического разряда.

К регистрируемым параметрам относятся временные зависимости тока в канале разряда $I(t)$ и напряжения на межэлектродном промежутке $U(t)$. Измерительная система выполнена в соответствии с рекомендациями [7]. Датчиком тока в канале разряда (ДТ2) служит коаксиальный малоиндуктивный шунт. Импульсное напряжение на разрядном промежутке измерялось с по-

мощью емкостного делителя напряжения (ДН). При этом обеспечивалась компенсация индуктивной составляющей этого напряжения посредством компенсационной катушки (КК). Электрические сигналы с датчиков тока и напряжения фиксировались запоминающим осциллографом типа Tektronix.

Работа схемы стенда заключается в том, что по достижении заданных напряжений на накопителях С1 и С2 с пульта управления подается сигнал на блок поджига БП-1 и соответственно на запуск разрядника первого контура QF1. После его срабатывания через заданное время должен запуститься разрядник второго контура QF2. В результате такого включения в плазменном канале разрядного промежутка формируется необходимый по форме импульс тока, обеспечивающий требуемый профиль импульса давления в технологической зоне. Предварительные исследования показали, что включение второго контура должно происходить в пределах длительности первой полуволны импульса тока первого контура, что составляет всего несколько десятков микросекунд. В этой связи основной задачей, которая решалась при изучении схемы двухконтурной установки ГИТ, было обеспечение автоматической временной задержки включения второго контура относительно первого. Причем величина этой задержки должна быть регулируемой.

Точкой отсчета для формирования импульса запуска блока поджига второго контура БП-2 было принято начало тока разряда первого контура. Производная этого тока на индуктивном элементе способна сформировать импульс напряжения, по величине достаточный для запуска блока поджига второго контура БП-2 и разрядника QF2. В качестве элемента, формирующего такой импульс напряжения, применялся пояс Роговского по схеме RL -интегрирования, смонтированный на токоподводе первого контура (рис. 1). Для уменьшения временных потерь, а также с целью повышения временной стабильности и помехоустойчивости сигнал с пояса Роговского подавался на линию задержки (ЛЗ), а с нее – непосредственно на управляющий электрод силового тиристора БП-2. Конструкция ЛЗ должна была обеспечить требуемый временной интервал задержки срабатывания второго контура.

ЛЗ, по сути, – длинные формирующие линии, большей частью – искусственные, представляющие собой LC-цепочки из конденсаторов и индуктивных элементов, а точнее – из ряда последовательно соединенных фильтров нижних частот. Линии задержки применяются в устройствах цветного телевидения, осциллографических устройствах со ждущей разверткой, радио-

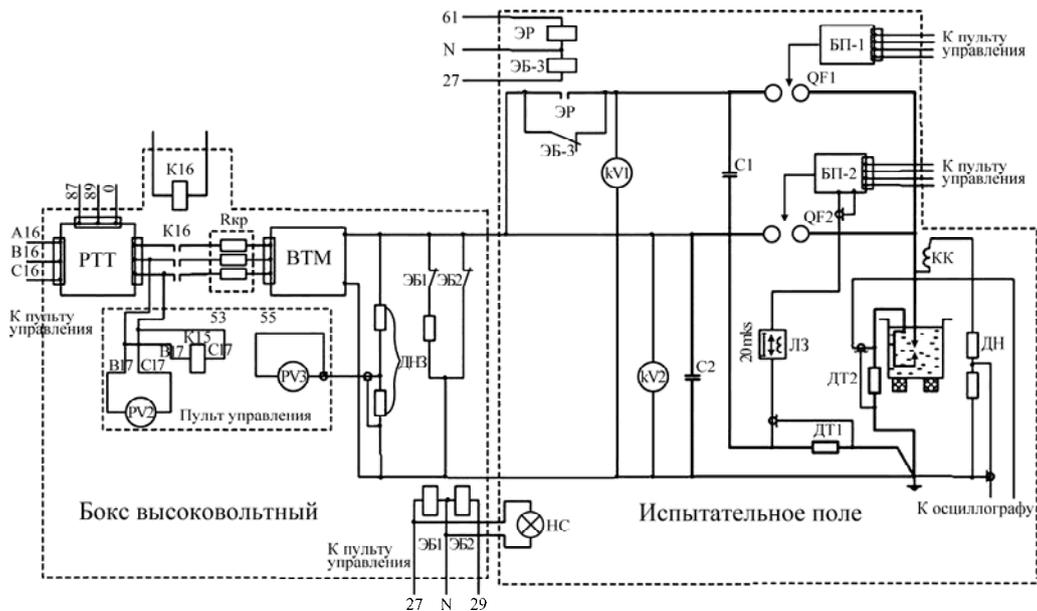


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: РТТ – регулятор-трансформатор тока; ВТМ – высоковольтный трансформатор; С1, С2 – емкостные накопители; БП-1, БП-2 – блоки поджига; ЭБ-1, ЭБ-2, ЭБ-3 – электроблокировки; ЭР – электроразъединитель; QF1, QF2 – управляемые разрядники; КК – компенсационная катушка; PV2, PV3 – вольтметры индикаторные; kV1, kV2 – киловольтметры; ДТ1, ДТ2, ДН, ДНЗ – датчики тока, напряжения; ЛЗ – импульсная линия задержки.

локационных станциях с селекцией подвижных цепей, в устройствах оптимальной фильтрации сложных радиолокационных сигналов, в управлениях ЭВМ и т.п. [8]. Существуют ЛЗ с временами задержки от долей до десятков тысяч микросекунд в зависимости от их назначения и соответственно конструкции. Для вышеперечисленных устройств они чаще всего выполнены в виде модулей со множеством отводов (например, ЛЗТ-4.0-1200), что позволяет получить разные значения временной задержки. В слаботочных электронных устройствах с достаточно большими входными и выходными сопротивлениями между элементами применяются ЛЗ, выпускаемые промышленностью с достаточно высоким внутренним сопротивлением (например, ЛЗТ-4.0-1200 имеет внутреннее сопротивление 1,2 к Ω). Использование их 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 сделать это в данном стенде потребовалось применение дополнительных электронных согласующих устройств, усиливающих сигнал по току, что существенно ухудшило стабильность работы цепи ЛЗ и 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 было решено создать ЛЗ с низкоомным входным сопротивлением, состоящую из ряда последовательно соединенных фильтров нижних частот. Расчет элементов ЛЗ выполнялся на основе общеизвестных методик [8].

Созданная ЛЗ (рис. 2) состоит из десяти последовательно соединенных П-образных фильтров нижних частот со следующими параметрами элементов: емкость конденсаторов С1–С11 = 0,47 μF ; индуктивность катушек L1–L10 = 9 μH ; входная индуктивность $L_{\text{вх}} = 4,5 \mu\text{H}$. Время задержки каждой ступени $t_{\text{зи}} = 2,0 \mu\text{s}$, а максимальное время задержки – 20 μs . Амплитуда передаваемого импульса напряжения $\leq 40 \text{ В}$. Характеристическое сопротивление созданной ЛЗ $Z_{\text{ЛЗ}} = 4,7 \Omega$. Выбор необходимого времени задержки, то есть подключение соответствующего звена схемы (рис. 2), осуществляется с помощью галетного переключателя SA. Для снижения электромагнитного взаимодействия между звеньями ЛЗ все катушки индуктивности крепились на плате в вертикальном положении с расстоянием между ними, равным четырем диаметрам каркаса катушки. Плату ЛЗ вместе с переключателем длительности задержки разместили в металлическом корпусе.

Наладка макета созданной ЛЗ осуществлялась с помощью генератора прямоугольных импульсов Г5-66 с параметрами сигнала: амплитуда импульса напряжения – $U = 12 \text{ В}$; длительность импульса $t_{\text{имп}} = 5 \mu\text{s}$. В результате оказалось, что время задержки каждой ступени $t_{\text{зи}} = 2,05 \mu\text{s}$, а длительность переднего фронта прямоугольных сигналов с амплитудой 12 В увеличивалась с 0,2 до 0,8 μs .

Экспериментальная проверка двухконтурной установки с разработанной схемой автоматического запуска второго контура проводилась в режиме короткого замыкания и при разрядах в

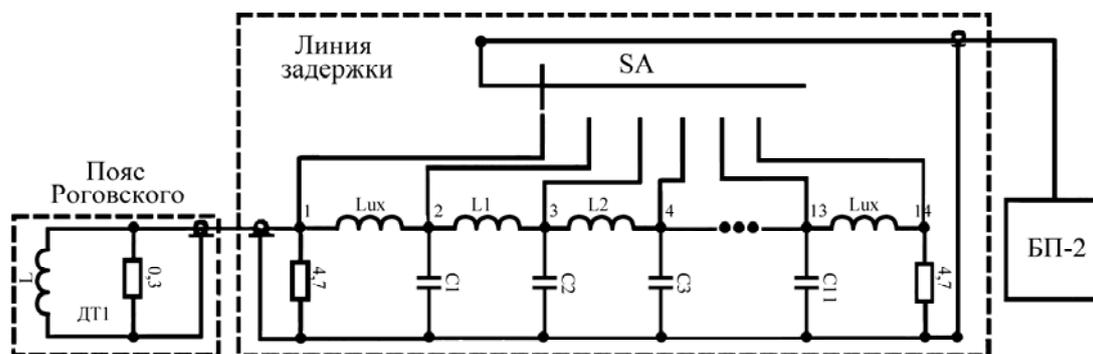


Рис. 2. Принципиальная схема линии задержки.

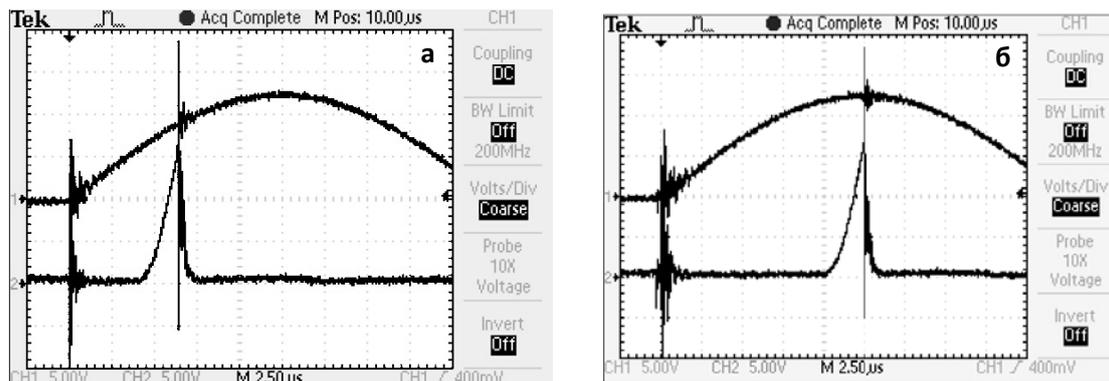


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения при КЗ разрядного контура: (а) – в начале процесса; (б) – в районе максимума тока.

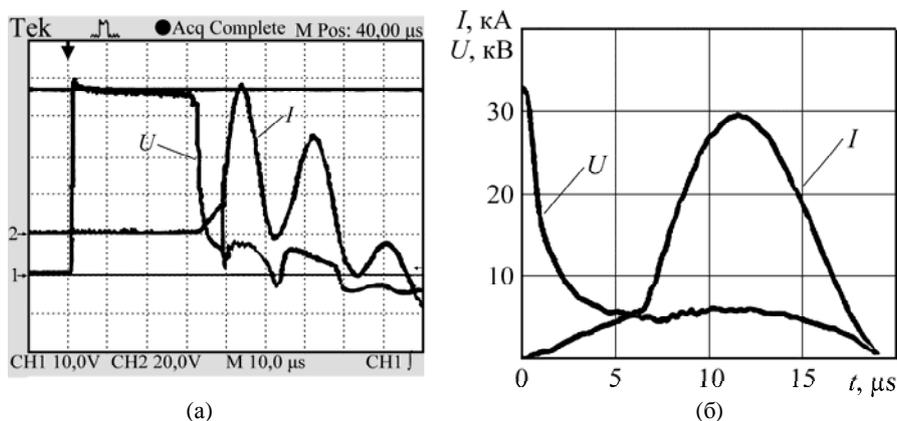


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения при разряде в воде:

(а) – полученные путем осциллографирования; (б) – в результате компьютерной обработки.

водной среде. Для проверки пошагового изменения времени задержки заряжался накопитель только первого контура. Одновременно осциллографировались ток короткого замыкания в первом контуре и импульс напряжения на управляющем электроде разрядника второго контура QF2, что позволяло с достаточно высокой точностью определять время задержки срабатывания второго разрядника относительно начала тока в первом контуре. Всего проведено 10 серий экспериментов (для каждой длительности задержки) – по 20 разрядов в каждой серии. Ложных срабатываний второго разрядного контура относительно начала тока разряда не было. Отклонение длительности задержки во всем диапазоне

регулирования (2–20 μs) не превышало 0,5 μs . Характерные осциллограммы представлены на рис. 3.

Эксперименты в воде проводились на длине разрядного промежутка $l = 0,004$ м при следующих параметрах разрядных контуров: емкость первой секции конденсаторов $C1 = 6 \mu\text{F}$; емкость второй секции конденсаторов $C2 = 2,86 \mu\text{F}$; зарядное напряжение первой и второй секций – 36 и 40 кВ; суммарная индуктивность первого контура $L1 = 22 \mu\text{H}$, второго $L2 = 3,1 \mu\text{H}$. Было проведено 8 серий экспериментов – по 3 разряда в каждой, которые подтвердили характеристики ЛЗ, полученные в режиме короткого замыкания, а также стабильность формирования тока разряда

сложной формы. Как пример (рис. 4) показан случай, когда второй контур подключается к разрядному промежутку через $7 \mu\text{s}$ после начала процесса разряда.

Анализ осциллограмм, полученных в процессе эксперимента (рис. 4а) и после компьютерной обработки (рис. 4б), позволяет сравнить экспериментальные кривые тока с полученными ранее расчетным путем [9] и показать их точное совпадение как по величине амплитуд, так и по форме тока.

Таким образом, экспериментальные исследования позволяют утверждать, что предложенная схема автоматического запуска второго контура в двухконтурном ГИТ обеспечивает стабильный запуск и достаточно точную (для технологических устройств) длительность задержки срабатывания второго контура, что в итоге позволяет пропускать в разрядном промежутке импульсный ток сложной конфигурации, обеспечивающий необходимую для рассматриваемой РИТ форму волны давления в зоне обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. К.: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Под ред. Г.А. Гулого. *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта*. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
3. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. К.: Наукова думка, 1992. 168 с.
4. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. К.: Наукова думка, 1986. 208 с.
5. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них. *Техническая электродинамика*. 2009, (6), 54–60.
6. Вовченко А.И., Поздеев В.А., Штомпель И.В. Параметры подводного электрического разряда в условиях сложного энерговода. *Техническая электродинамика*. 1985, (3), 30–35.
7. Шваб А. *Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и системы измерений*. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
8. Гольденберг Л.М. *Основы импульсной техники*. М.: Связьиздат, 1963. 400 с.
9. Тертилов Р.В. Оптимизация разрядно-импульсных технологий на базе применения двухконтурных ГИТ. *Техническая электродинамика*. 2011, (3), 67–72.

Поступила 28.03.12

Summary

The need for the development of multi-circuit pulse current generators with controlled switching of each of the circuits for discharge pulse technologies, which require a complicated profile of pressure wave in operating zone, is shown. The scheme of automatic switching of the second circuit in a high-voltage double-circuit generator of pulse currents, which has high level of resistance for electromagnetic interference and ensures a fairly accurate (for technological devices) controlled duration of the second circuit operation, is proposed, developed and studied. The possibility of complicated current pulse formation, which is adjustable for time and amplitude, is confirmed.