

УДК 621.983.044.7

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ФОРМОЙ И ПАРАМЕТРАМИ РАЗРЯДНОГО ТОКА

© 2022 Р.Ю. Юсупов<sup>2</sup>, В.А. Глущенко<sup>1,2</sup>, А.Н. Маслов<sup>2</sup><sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самара, Россия<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

В работе рассмотрены методы и схемотехника создания многофункциональной магнитно-импульсной установки с изменяемыми параметрами разрядного тока для формирования импульсных магнитных полей. Установка предназначена для проведения комплексных исследований по воздействию магнитного поля на различные материалы в машиностроении, медицине, фармакологии и растениеводстве. В настоящее время традиционные конструкции установок работают в режиме однократного разряда и генерируют импульсы тока колебательной формы в виде затухающей синусоиды. Разработанная установка энергоемкостью 5 кДж работает в четырех режимах: колебательного разряда одного накопителя энергии с высокой частотой разрядного тока, синхронного разряда двух накопителей энергии, асинхронного разряда двух накопителей с регулируемой задержкой относительно друг друга и в режиме формирования моноимпульса с отсечкой тока последующих полупериодов. В работе приведена структурная схема многофункциональной магнитно-импульсной установки (МИУ). Даны рекомендации по выбору основных компонентов при создании специализированных установок для решения конкретных задач. Приведены результаты испытания МИУ. *Ключевые слова:* магнитно-импульсная установка, вакуумный разрядник, импульсный тиратрон, разрядник «Кроубар», индуктор.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-85-92

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) используется в различных отраслях машиностроения для выполнения технологических операций штамповки, сборки, сварки, улучшения структуры материалов [1]. МИОМ также находит применение в медицине, биологии и сельском хозяйстве для обработки лекарственных форм, клеточных структур и растений с целью повышения их свойств и биологической активности [2, 3].

В технологии МИОМ воздействие на материалы осуществляется бесконтактно, импульсным магнитным полем (ИМП) высокой интенсивности в дозированной форме. Магнитное поле формируется в технологическом индукторе при разряде на него емкостного накопителя энергии магнитно-импульсной установки (МИУ). В результате импульсного воздействия реализуются высокие скорости и плотности выделения энергии, выявляются новые свойства материалов, позволяющие обеспечить качественно иной уровень обработки, недоступный обычным методам.

*Юсупов Ринат Юсупович, научный сотрудник.  
Глущенко Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Биоинженерия» Самарского федерального исследовательского центра РАН. E-mail: vgl@ssau.ru  
Маслов Александр Евгеньевич, инженер-конструктор.*

Традиционные конструкции МИУ работают в режиме однократного разряда и формируют импульс магнитного поля колебательного характера в виде затухающей синусоиды с числом знакопеременных полупериодов от 3 до 10, что вносит определенные ограничения в использовании МИОМ.

Для проведения комплексных исследований использования ИМП в медицине, фармакологии и растениеводстве в настоящее время отсутствуют генераторы, позволяющие изменять параметры воздействия в широком диапазоне интенсивности, длительности и различной формы импульсов, поэтому требуется МИУ с изменяемыми параметрами и формой воздействующих импульсов на обрабатываемые материалы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В емкостном накопителе энергии МИУ батарея конденсаторов заряжается от высоковольтного выпрямителя, а разряд на нагрузку (индуктор) происходит включением управляемого разрядника [4].

Традиционная схема разрядного контура МИУ состоит из цепи последовательно соединенных: емкости накопителя энергии  $C_0$ , заряженного до напряжения  $U_0$ ; внутренней индуктивности  $L_0$ , индуктивности индуктора  $L_1$  и активного сопротивления соединительных шин, разрядника и индуктора  $R$  (рисунки 1).

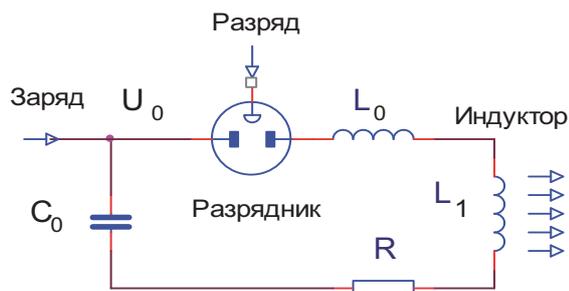


Рис. 1. Эквивалентная схема разрядного контура МИУ

Переходный процесс разряда описывается известным уравнением [5]:

$$\gamma = 0,5R \sqrt{\frac{C_0}{(L_0 + L_1)}}, \quad (1)$$

где:  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий колебательный процесс разрядного тока в зависимости от параметров разрядного контура МИУ;  $L_0$  – собственная индуктивность разрядного контура;  $L_1$  – индуктивность индуктора;  $C_0$  – емкость накопителя энергии;  $R$  – эквивалентное сопротивление разрядного контура.

В зависимости от параметров разрядной цепи разряд может быть колебательным при  $\gamma < 1$  (рис. 2) или апериодическим при  $\gamma \geq 1$  (рис. 3).

Декремент затухания разрядного тока  $\delta$  можно определить по осциллограмме тока. На рисунке 2 показана характерная форма разрядного тока МИУ.

$$\delta = \ln \frac{I_{1max}}{I_{3max}}, \quad (2)$$

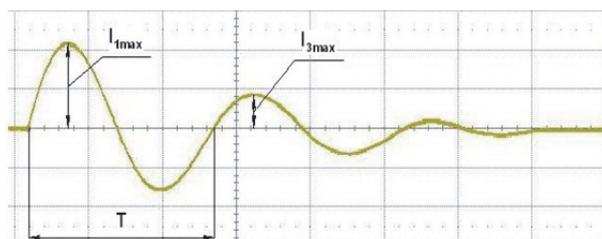


Рис. 2. Разрядный ток МИУ в режиме колебательного разряда:  
 $I_{1max}$  – амплитуда 1<sup>го</sup> полупериода тока;  
 $I_{3max}$  – амплитуда 3<sup>го</sup> полупериода,  
 $T$  – период колебаний

В режиме колебательного разряда со слабым затуханием отношение энергии магнитного поля к накопленной электрической энергии в накопителе приближается к единице, при индуктивности индуктора больше внутренней индуктивности накопителя -  $L_1 \gg L_0$ .

Частота колебаний разрядного тока:

$$F_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{L_0 \cdot C_0} - \frac{R^2}{4 \cdot (L_0 + L_1)^2}\right)}. \quad (3)$$

Чем меньше величина индуктивности и емкости, тем больше частота разряда, которая определяет эффективность процесса МИОМ при обработке металлических материалов. Для формирования ИМП с большой длительностью, например, для биологических объектов, используют накопитель энергии с большей емкостью и многovitковые индукторы с большой индуктивностью.

При разряде с критическим затуханием, близком ( $\gamma = 0,5$ ), для создания магнитного поля в лучшем случае используется не более 13% накопленной энергии МИУ (рис. 3). Поэтому в разрядном контуре МИУ стремятся использовать элементы с минимальными активными сопротивлениями: конденсаторов, разрядника, ошиновки и индуктора, которые выполняются из материалов с высокой электропроводностью.

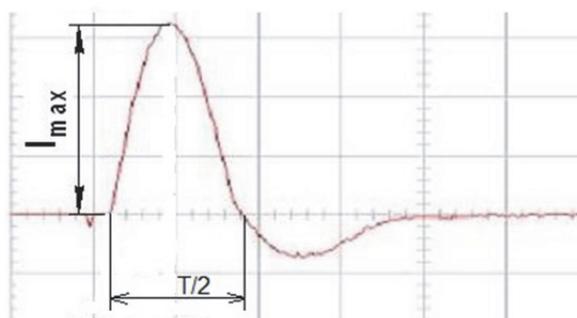


Рис. 3. Критический разряд с затуханием  $\gamma = 0,5$ :  
 $I_{max}$  – максимальная амплитуда тока;  
 $T/2$  – эффективная длительность импульса тока

В технологии МИОМ при колебательном разряде основная полезная работа по деформированию материала совершается в течение первого полупериода ( $T/2$ ), поэтому влиянием последующих полупериодов с низкой амплитудой можно пренебречь. Такой режим характерен при обработке металлов из сталей с низкой электропроводностью. При обработке металлов с высокой электропроводностью (медь, алюминий) разрядный ток в индукторе - колебательный со слабым затуханием, при котором вторые и последующие полупериоды в полезной работе деформации не участвуют, но приводят к нежелательному нагреву индуктора. Таким образом, последующие полупериоды колебания разрядного тока являются вредными, так как они сокращают ресурс конденсаторов, индуктора и элементов ошиновки накопителя энергии, тем сильнее, чем меньше затухание колебаний [6].

Поэтому для получения в индукторе моно импульса тока в первом полупериоде прибегают к шунтированию конденсатора накопителя  $C_0$  в момент изменения полярности разрядного тока при переходе на второй полупериод колебаний. Такой режим называется «Кроубар» и используется для повышения эффективности процесса МИОМ, когда через индуктор требуется пропу-

скасть однократный импульс, без второго и последующих полупериодов тока [6].

Примеры использования режима «Кроубар»:

- в технологии импульсной сварки - для уменьшения влияния колебаний сварного соединения в момент диффузии соединяемых металлов;
- при обработке режущего инструмента магнитным полем - способствуя заданному распределению структуры металла на режущей кромке;
- при операциях импульсной резки и пробивки отверстий в металлических заготовках - уменьшается длительность и интенсивность электрической дуги, которая возникает в момент разделения материала и приводит к образованию плазмы, снижающей ресурс индуктора;
- при обработке биологических объектов ИМП, улучшается структура обрабатываемого вещества по направлению линий магнитного поля и повышается его биологическая активность;
- в технологии намагничивания ферромагнетиков - для получения сверх сильных постоянных магнитов из редкоземельных металлов.

В технологии импульсной штамповки, сборки и калибровки в машиностроении проявляется нежелательный эффект отскока заготовки при соударении с высокой скоростью с матрицей или оправкой. Для устранения этого явления можно использовать МИУ с двумя накопителями энергии, работающие в режиме асинхронного разряда. Обработка материала производится последовательными импульсами с регулируемой задержкой относительно друг друга.

Примеры применения МИУ с асинхронным разрядом блоков накопителей:

- Для обработки стальных заготовок с низкой электропроводностью применяют промежуточный материал (спутник) между индуктором и заготовкой. Для исключения приваривания спутника к заготовке, используют два импульса при большой скорости деформации. На начальной стадии первым блоком накопителя формируется малое и медленное нарастающее магнитное поле в течение первого полупериода импульса тока, которое уплотняет и плотно прижимает спутник к заготовке; на второй стадии, с соответствующей задержкой, включается другой блок накопителя и окончательно деформирует заготовку со спутником.
- При операциях калибровки удар заготовки по матрице происходит в первый полупериод разрядного тока МИУ, после этого появляется упругий отскок, а уменьшающееся в последующие полупериоды давление магнитного поля не препятствует этому. Для уменьшения величины отскока и, следовательно, повышения точности калибровки необходимо в момент удара заготовки воздействовать на нее дополнительным импульсом давления. Дополнительный импульс

формируется вторым блоком накопителя с необходимой задержкой разряда относительно первого блока, при котором к моменту начала отскока заготовки на нее будет действовать давление ИМП от второго блока [7].

Для исследования эффективных методов МИОМ разработана многофункциональная магнитно-импульсная установка с возможностью изменения параметров и формы ИМП, воздействующего на материалы в различных областях применения.

### СХЕМОТЕХНИКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МИУ

Многофункциональная МИУ-БИО-5 универсального назначения предназначена для проведения исследований в различных областях применений: в фармакологии, медицине и сельском хозяйстве, а также по воздействию ИМП высокой интенсивности в технологии МИОМ для отраслей машиностроения, энергетики и приборостроения других.

Разработанная МИУ позволяет формировать в индукторе импульсы разрядного тока различной формы: однократный колебательный; униполярный, с отсечкой последующих полупериодов (режим «Кроубар») или двумя импульсами, следующими последовательно с регулируемой скважностью (рисунок 4).

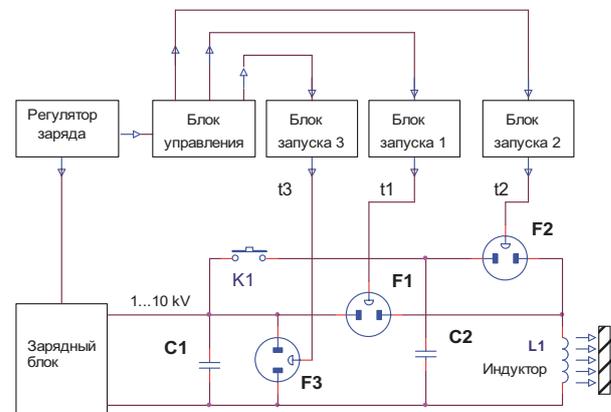


Рис. 4. Структурная схема МИУ

Зарядный блок обеспечивает автоматический заряд накопителей энергии C1 и C2 по заданной программе. Интенсивность воздействия ИМП в индукторе задается регулятором заряда изменением уровней напряжения на конденсаторах в широких пределах - 1...10 кВ. Алгоритмом работы многофункциональной МИУ предусматривает четыре режима формирования разрядных токов в индукторе:

**Режим 1** – однократный колебательный разряд с запасаемой энергией до 3 кДж с высокой частотой разрядного тока 70 кГц. В этом режиме используется накопитель C1 емкостью 60 мкФ и

разрядник F1, при этом, цепи заряда накопителя C2 и блоки запуска 2, 3 разрядников F2, F3 отключены контактором K1 и неактивны.

**Режим 2** – синхронный разряд двух автономных накопителей C1 и C2 с суммарной энергией до 6 кДж и общей емкостью 120 мкФ. Контакторм K1 включается цепь заряда второго накопителя C2 и блок запуска 2. Разряд накопителей энергии происходит синхронно, одновременной подачей импульсов от блоков запуска 1 и 2 на разрядники F1 и F2. Импульс запуска разрядника F2 проходит без задержки относительно F1.

**Режим 3** - асинхронный последовательный разряд двух накопителей C1 и C2 на общую нагрузку L1, с регулируемой задержкой (t1 - t2) блоков запуска разрядников F1 и F2 относительно друг друга.

**Режим 4** («Кроубар») – разряд накопителя C1 с отсечкой тока во втором или последующих полупериодах с регулируемой задержкой (t1 - t3) запуска разрядника F3 относительно основного разрядника F1, при этом накопитель C2 и разрядник F2 отключены.

Для стабильной работы МИУ в различных режимах разрядники F1...F3 запускаются с помощью автономных блоков запуска поджигающими импульсами амплитудой не менее 12 кВ. Для исключения ложных включений в режимах асинхронного разряда и «Кроубар» блоки запуска включаются через оптоэлектронную гальваническую развязку цепей блока управления и силовых элементов блоков запуска.

Использование в схеме задержки цифровых компонентов на КМОП-логике показало низкую помехоустойчивость системы управления. Поэтому схема блока управления содержит два таймера с регулируемой задержкой, выполненных на аналоговых компонентах с RC-задающими временными цепочками, как наиболее устойчивых к электромагнитным помехам при включении разрядников.

Для увеличения к.п.д. процесса МИОМ стремятся уменьшить собственную индуктивность конденсаторов -  $L_c$ , разрядника -  $L_j$ , и соединительных цепей разрядного контура -  $L_s$  в накопителе энергии по сравнению с индуктором - L1

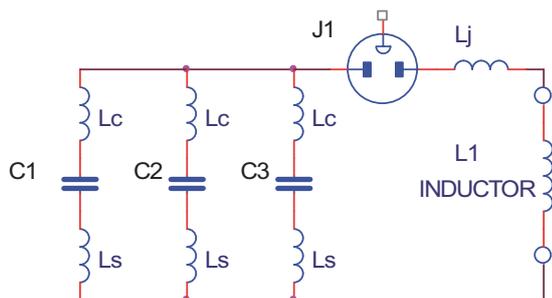


Рис. 5. Эквивалентная схема разрядного контура МИУ

[4]. Эффективной мерой уменьшения индуктивности накопителя является параллельное соединение отдельных конденсаторов C1...C3 в общую батарею, как показано на рисунке 5.

Условие эффективной передачи энергии из разрядного контура МИУ в индуктор на примере рисунка 5:

$$L1 \gg \frac{(L_c + L_s)^2}{3 \cdot (L_c + L_s)^2} \cdot \quad (3)$$

В накопителе энергии многофункциональной МИУ использованы импульсные конденсаторы с высокой удельной энергией КПИМ1-14-20 емкостью 20 мкФ и собственной индуктивностью 30 нГн [8]. Ошиновка разрядного контура выполняется с минимальной индуктивностью из плоских шин, разделенных тонкой изоляцией. Конденсаторы объединены параллельно ошиновкой в батарею суммарной емкостью 60 мкФ.

Основные требования к разрядникам при работе в режимах синхронного разряда и «Кроубар»: рабочий диапазон напряжения - 1...20 кВ; низкая собственная индуктивность, не более 40 нГ; малое время включения, не более 1...2 мкс и высокое быстродействие. Указанным требованиям удовлетворяют разрядники: вакуумные (серии РВУ) и тиратронные (серии ТДИ) [9, 10].

Таблица 1. Основные параметры вакуумных и тиратронных разрядников

Тип	U <sub>0</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (кА)	L <sub>j</sub> (нН)	T <sub>0</sub> (μs)
РВУ-57	1...20	200	30...40	≤ 2
ТДИ-150/25	0,5...25	150	25	0,5

где: U<sub>0</sub> – рабочий диапазон напряжения заряда; I<sub>max</sub> – максимальная амплитуда импульсного тока; L<sub>j</sub> – собственная индуктивность разрядника; T<sub>0</sub> – время включения.

Режим «Кроубар» с отсечкой тока при колебательном разряде реализуется шунтированием конденсаторов накопителя энергии с помощью малоиндуктивных высоковольтных диодных столбов или подключением параллельно конденсаторам быстродействующего разрядника.

На рисунке 6 показана конструкция малоиндуктивного диодного столба [11]. Такой диодный столб легко встраивается в конструкцию накопителя, не требуется специальной синхронизации с разрядным током.

Наряду с простотой аппаратной реализации, диодный столб имеет существенные недостатки: отсечка тока происходит только во второй четверти периода колебаний и не позволяет регулировать длительность импульса тока;



**Рис. 6.** Малоиндуктивный диодный столб СДЛ-3

сравнительно большая индуктивность, более 200 нГ; частотный диапазон ограничен до 3 кГц. Диодные столбы можно использовать для получения моноимпульсов тока в МИУ с многovitковыми индукторами и низкой частотой разрядного тока.

Поэтому, была выбрана более сложная схема регулируемой отсечки тока с помощью шунтирующего разрядника (F3 на рис. 4).

На рисунке 7 показана конструкция тиратронного и вакуумного разрядников. Малая собственная индуктивность и время включения управляемых тиратронов и вакуумных разрядников (табл. 1), по сравнению с воздушными, игнитронными и однократными разрядниками с взрывающейся фольгой, позволяют использовать их в системе отсечки тока на различных этапах колебательного разряда.



Тиратрон ТДИ150/25



Разрядник RVU-57

**Рис. 7.** Конструкция разрядников системы отсечки токов в режиме «Крубар»

Лучшими параметрами обладают тиратроны, имеющие наименьшую индуктивность  $L_1$ , время включения  $T_0$  и минимальный порог напряжения коммутации  $U_0$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

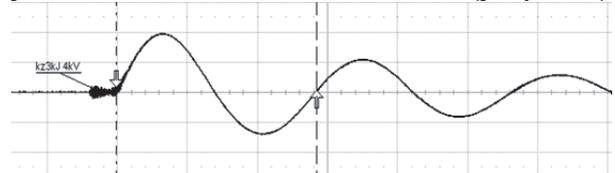
Испытания МИУ-БИО-5 проводились при разрядах в режиме короткого замыкания (КЗ) на выводах МИУ и на цилиндрический индуктор с алюминиевой заготовкой внутри. Число витков индуктора – 5, диаметр активной зоны – 60 мм. Параметры и

форма разрядного тока регистрировались с помощью встроенного бесконтактного датчика импульсного тока с коэффициентом преобразования – 5,5 кА/В и цифрового запоминающего осциллографа «WaveSurfer 3024zR». Циклы заряда и разряда проводились в четырех режимах, описанных выше, в диапазоне напряжения заряда от 3 до 8 кВ.

Проверена работа МИУ в рабочем диапазоне напряжений 1...9,5 кВ. В процессе испытаний самопроизвольных разрядов не наблюдалось. После разрядов остаточное высоковольтное напряжение в накопителе энергии отсутствует.

На рисунках 8...13 приведены характерные токовые кривые при различных режимах работы МИУ-БИО-5.

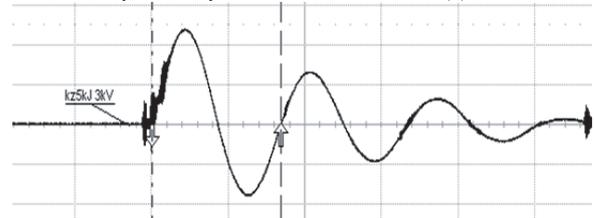
1. Режим однократного колебательного разряда одного накопителя энергии в режиме короткого замыкания на выводах МИУ (рисунок 8):



**Рис. 8.** Осциллограмма разрядного тока в режиме КЗ одного накопителя энергии при напряжении заряда 4 кВ:

(масштаб развертки – 5 мкс/дел; амплитуда тока – 100 кА; частота – 71 кГц)

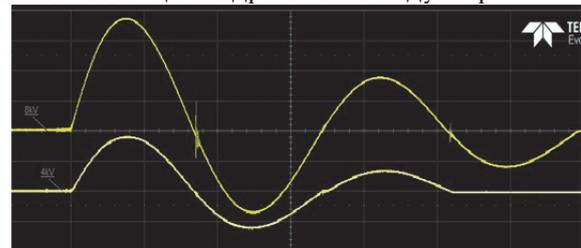
2. Режим синхронного разряда двух накопителей энергии в режиме КЗ на выводах МИУ.



**Рис. 9.** Осциллограмма синхронного разряда в режиме КЗ двух накопителей при напряжении заряда 3 кВ:

(масштаб развертки – 10 мкс/дел, амплитуда тока – 130 кА; частота – 60 кГц)

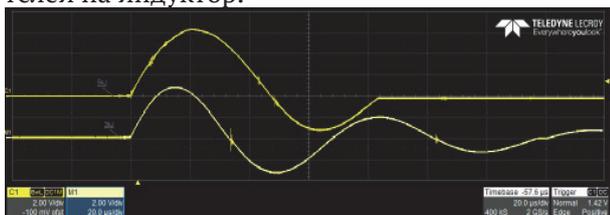
3. Режим колебательного разряда одного накопителя на цилиндрический индуктор:



**Рис. 10.** Осциллограммы разрядного тока в индукторе одного накопителя энергии (масштаб развертки – 20 мкс/дел;

- верхний луч при напряжении заряда 8 кВ, амплитуда тока – 42 кА;  
- нижний луч при напряжении заряда 4 кВ, амплитуда тока – 20,5 кА)

4. Режим синхронного разряда двух накопителей на индуктор.



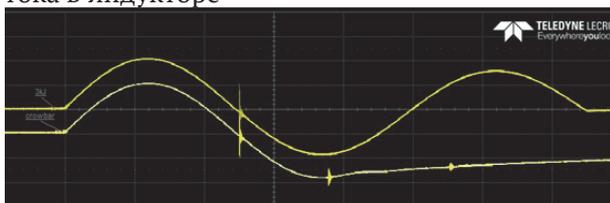
**Рис. 11.** Сравнительные осциллограммы тока в режиме синхронного разряда двух накопителей на индуктор: (масштаб развертки – 20 мкс/дел.; - верхний луч, синхронный разряд двух накопителей энергии при напряжении заряда 5 кВ, амплитуда тока - 33 кА; - нижний луч, сравнительный разряд одного накопителя при напряжении заряда 3 кВ, амплитуда - 26 кА)

5. Асинхронный режим разряда двух накопителей на индуктор.



**Рис. 12.** Сравнительные осциллограммы тока в режиме асинхронного разряда двух накопителей с разной задержкой: (масштаб развертки – 100 мкс/дел.; - верхний луч, асинхронный разряд с задержкой 440 мксек; - нижний луч, разряд двух накопителей энергии, с задержкой 250 мксек).

6. Режим разряда («Кроубар») с отсечкой тока в индукторе



**Рис. 13.** Сравнительные осциллограммы тока в режиме разряда «Кроубар» с отсечкой тока и колебательном, без отсечки тока в индукторе: (масштаб развертки – 20 мкс/дел.; - верхний луч, колебательный разряд без отсечки тока; - нижний луч, аperiodический разряд с отсечкой колебаний  $2^{nd}$  и последующих полупериодов тока

Выводы по результатам испытаний:

Собственная частота и индуктивность разрядного контура определены по осциллограммам разрядного тока в режиме короткого замыкания на выходных зажимах МИУ (рис. 8, 9). В режиме 1 (разряд одного накопителя) частота тока составила не менее 70 кГц, индуктивность разрядного контура не более 80 нГн. В режиме 2

(синхронный разряд двух накопителей) частота тока не менее 60 кГц, индуктивность разрядного контура не более 60 нГн.

На осциллограмме (рис. 10), при неизменных параметрах индуктора, частота тока при различных напряжениях заряда одинакова и отличается только амплитудой, что указывает на стабильность тока в режиме колебательного разряда МИУ.

На осциллограмме синхронного разряда (верхний луч, рис. 11) частота разрядного тока меньше частоты при разряде одного накопителя, это согласуется с расчетом и указывает на синхронное включение обоих накопителей энергии.

На осциллограмме асинхронного разряда (рис. 12) видна возможность регулировки задержки парных импульсов относительно друг друга в широком диапазоне длительности задержки - 50...1000 мксек.

На осциллограмме в режиме «Кроубар» (нижний луч, рис. 13) виден срыв колебательного процесса. Затяжка заднего фронта импульса в районе второго полупериода объясняется потерями развития плазмы в вакуумном разряднике при малых токах коммутации, а также сравнительно большой внутренней индуктивностью вакуумного разрядника и цепей подключения его к накопителю, что обусловлено особенностями конструкции разрядника РВУ-57.

Для уменьшения длительности заднего фронта предпочтительно использовать тиратронный разрядник ТДИ-150/25, у которого меньше потери в развитии плазмы в газовой среде тиратрона и низкая собственная индуктивность по сравнению с вакуумным разрядником.

Для формирования моно импульса с укороченным задним фронтом рекомендуется использовать второй малоиндуктивный «кроубарный» разрядник, подключаемый параллельно выводам МИУ. Этот разрядник запускается синхронно с «кроубарным» разрядником шунтирующим конденсаторы накопителя энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многофункциональная МИУ-БИО-5 найдет применение при отработке технологии МИОМ в различных отраслях промышленности, а также для проведения исследований по воздействию импульсных магнитных полей на вещества в жидкой и твердой фазе, в том числе в герметичном флаконе или ампуле: в медицине, биологии; на растения и семена в сельском хозяйстве.

Например, при обработке импульсным магнитным полем антибиотика могут изменяться межатомные расстояния и конформация молекул лекарственного препарата. Поэтому, по-

добранные параметры воздействия ИМП на антибиотик адресно изменяют конформацию молекулы, что способствует повышению активности антибиотика, ускоряющее процессы действия лекарственных препаратов.

При воздействии ИМП различной формы и амплитуды на растения выявляются эффекты замедляющие развитие вирусов в них, например, для оздоровления картофельных растений от вирусных инфекций и при создании новых сортов семенных материалов.

2. При разработке многофункциональной МИУ с изменяемыми параметрами воздействия ИМП на различные объекты определены основные схемотехнические решения, позволяющие создавать специализированные МИУ для решения конкретных задач в различных областях применения. В частности, для формирования моноимпульсов тока наиболее эффективно применять в качестве мощных коммутаторов тока управляемые вакуумные и тиратронные разрядники с малой собственной индуктивностью и временем включения.

Для стабильной работы МИУ с несколькими накопителями энергии, которые коммутируются по заданной программе с задержкой, необходимо обеспечить высокую помехоустойчивость системы управления, используя оптоэлектронную гальваническую развязку цепей управления с силовыми высоковольтными элементами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушченков, В.А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов / В.А. Глушченков, В.Ф. Карпухин. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
2. Патент RU № 2704317 РФ, МПК А61N 2/04, А61N 2/00, А61P 31/04. Способ увеличения антибактериальной активности антибиотиков / Глушченков В.А., и другие; – № 2019113191, заявл. 29.04.2019; опубл. 28.10.2019, Бюл. № 31.
3. Патент RU № 2761498, МПК А01G 7/04. А01C 1/00. Способ оздоровления растений картофеля от вирусных инфекций / Шевченко С.Н. и другие; – № 2021106114, заявл. 09.03.2021; опубл. 08.12.2021, бюл. № 34.
4. Юсупов, Р.Ю. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глушченков. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2013 – 128 с.
5. Кужекин, И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении / И.П. Кужекин. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
6. Авторское свидетельство СССР № 605661, кл. В21 D26/14. Установка для магнитно-импульсной обработки / Есин А.А. и другие; – № 2330017/27, заявл. 02.03.1976; опубл. 05.05.1978, Бюл. № 17.
7. Авторское свидетельство СССР № 1570129 SU, кл. В21 D26/14. Способ магнитно-импульсной обработки материалов / Глушченков В.А. и другие; – № 4333054/27, заявл. 24.11.1987; опубл. 20.05.1999.
8. Ермилов, И.В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с пленочным диэлектриком / И.В. Ермилов // Электронные компоненты. – 2005. – № 4. – С. 37 – 44.
9. Алферов, Д.Ф. Управляемые вакуумные разрядники: Основные свойства и применение / Д.Ф. Алферов, В.П. Иванов, В.А. // Электро. – 2002. – № 2. – С. 31-37.
10. Бочков, В.Д. Мощные коммутаторы тока с низким давлением газа / В.Д. Бочков, В.М. Дягилев, Ю.Д. Королев, В.Г. Ушиц // Приборы и техника эксперимента – 1998. – №5. – С. 91 – 96.
11. Русская технологическая группа 2. – URL: <http://www.rustechgroup.ru> (дата обращения: 12.08.2022).

#### MULTIFUNCTIONAL PULSE-MAGNETIC INSTALLATION WITH VARIABLE SHAPE AND PARAMETERS OF THE DISCHARGE CURRENT

© 2022 R.Yu. Yusupov<sup>2</sup>, V.A. Glushchenkov<sup>1,2</sup>, A.N. Maslov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara Federal Research Centre of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University named by academician S.P. Korolyev, Samara, Russia

*Annotation.* The paper considers methods and circuitry for creating a multifunctional pulse-magnetic installation with variable parameters of the discharge current for forming of pulsed magnetic fields. The installation is designed to conduct comprehensive research on the effect of the magnetic field on various materials in mechanical engineering, medicine, pharmacology and plant growing. Currently, traditional designs of the installations operate in a single-discharge mode and generate oscillatory shaped pulses of current in the form of a damped sinusoid. The developed installation with power intensity of 5 kJ operates in four modes: oscillatory discharge of one energy storage device with a high frequency of the discharge current, synchronous discharge of two energy storage devices, asynchronous discharge of two storage devices with an adjustable delay relative to each other, and in the mode of forming a mono-pulse with a cutoff of the current of subsequent half-cycles. The paper presents the block diagram of the multifunctional pulse-magnetic installation (PMI), provides recommendations on the selection of the main components when creating specialized installations for solving specific tasks. The results of testing the PMI are given.

*Keywords:* pulse-magnetic installation, vacuum discharger, pulse thyatron, “Crowbar” discharger, inductor.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-85-92

## REFERENCES

1. *Glushchenkov, V.A.* Tekhnologiya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov / V.A. Glushchenkov, V.F. Karpuhin. – Samara: Izdatel'skij dom «Fedorov», 2014. – 208 s.
2. Patent RU № 2704317 RF, MPK A61N 2/04, A61N 2/00, A61P 31/04. Sposob uvelicheniya antibakterial'noj aktivnosti antibiotikov / Glushchenkov V.A., i drugie; – № 2019113191, zayavl. 29.04.2019; opubl. 28.10.2019, Byul. № 31.
3. Patent RU № 2761498, MPK A01G 7/04. A01C 1/00. Sposob ozdorovleniya rastenij kartofelya ot virusnyh infekcij/ SHEvchenko S.N. i drugie; – № 2021106114, zayavl. 09.03.2021; opubl. 08.12.2021, byul. № 34.
4. *Yusupov, R.Yu.* Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov: monografiya / R.Yu. Yusupov, V.A. Glushchenkov.– Samara: Izdatel'skij dom «Fedorov», 2013. – 128 s.
5. *Kuzhekin, I.P.* Ispytatel'nye ustanovki i izmereniya na vysokom napryazhenii / I.P. Kuzhekin. – M.: Energiya, 1980. – 136 s.
6. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 605661, kl. B21 D26/14. Ustanovka dlya magnitno-impul'snoj obrabotki / Esin A.A. i drugie; – № 2330017/27, zayavl. 02.03.1976; opubl. 05.05.1978, Byul. № 17.
7. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1570129 SU, kl. B21 D26/14. Sposob magnitno-impul'snoj obrabotki materialov / Glushchenkov V.A. i drugie; – № 4333054/27, zayavl. 24.11.1987; opubl. 20.05.1999.
8. *Ermilov, I.V.* Sovremennye impul'snye vysokovol'tnye kondensatory s plenochnym dielektrikom / I.V. Ermilov // Elektronnye komponenty. – 2005. – №4. – S. 37 – 44.
9. *Alferov, D.F.* Upravlyaemye vakuurnye razryadniki: Osnovnye svojstva i primeneniye / D.F. Alferov, V.P. Ivanov, V.A. // Elektro. – 2002. - № 2. – S. 31-37.
10. *Bochkov, V.D.* Moshchnye kommutatory toka s nizkim davleniem gaza / V.D. Bochkov, V.M. Dyagilev, Yu.D. Korolev, V.G. Ushich // Pribory i tekhnika eksperimenta – 1998. – №5. – S. 91 – 96.
11. Russkaya tekhnologicheskaya gruppa 2. – URL: <http://www.rustechgroup.ru> (data obrashcheniya: 12.08.2022).

*Rinat Yusupov, Researcher.*

*Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory «Bioengineering» of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. E-mail: vgl@ssau.ru*

*Alexander Maslov Evgenievich, Design Engineer.*