

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ВНЕШНЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

Щ.В. Аргун, ст. преподаватель, к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* В рамках статьи проведен анализ протекания электромагнитных процессов в магнитно-импульсной установке. Предложены схмотехнические решения её исполнения, как источника мощности для ремонтного комплекса. Определены основные технические характеристики предложенной магнитно-импульсной установки. Подробно раскрыт алгоритм ее работы.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная обработка металлов, магнитно-импульсная установка, зарядный контур, индукторная система, разрядный контур.

## СХЕМОТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСУ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ

Щ.В. Аргун, ст. викладач, к.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* В рамках статті проведено аналіз протікання електромагнітних процесів в магнітно-імпульсній установці. Запропоновано схмотехнічні рішення її виконання, як джерела потужності для ремонтного комплексу. Визначено основні технічні характеристики запропонованої магнітно-імпульсної установки. Детально розкрито алгоритм її роботи.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна установка, зарядний контур, індукторна система, розрядний контур.

## THE SCHEMATIC SOLUTION OF THE MAGNETIC-PULSE INSTALLATION FOR THE COMPLEX OF EXTERNAL MAGNETIC-PULSE STRAIGHTENING

Sch. Argun, senior lecturer, cand. eng. sc., KhNAHU

*Abstract.* Analyzes of the electromagnetic processes in the magnetic-pulse installation were done in this article. The schematic solutions of its construction as a source of power for the repair complex were proposed. The main technical characteristics of the magnetic-pulse installation were defined. The algorithm of its work was showed in the details.

*Key words:* magnetic pulse treatment of metals, magnetic pulse installation, charging circuit, inductor system, discharge circuit.

### Введение

В связи с развитием современных технологий, появились дополнительные возможности использования магнитных полей в различных отраслях науки и техники. Это позволяет решить широкий перечень задач современного промышленного производства в

авиа и автомобилестроении. В частности, методы магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) применяются при магнитно-импульсной штамповке профилей из металлических сплавов, сочленении и разборке сборных конструкций и т.д. [1-3]. Но особый интерес представляет использование данного метода для внешней рихтовки металлических

поверхностей (например, кузовов автомобилей) с вмятинами. Для реализации методов, использующих магнитные поля, необходимо наличие магнитно-импульсной установки (МИУ), генерирующей импульсы определенной амплитуды и частоты и индукторной системы - инструмента реализующего выполнение заданной операции.

### Анализ публикаций

Существующие схемы МИОМ, как правило, работают в режиме однократного силового воздействия на обрабатываемый объект [4, 5]. Здесь невозможно контролировать процесс обработки, необходимы громоздкие источники мощности, требуются существенные затраты на создание комплекса оборудования в целом и др.

Идея, предложенная авторами [6-10] и положенная в основу источника мощности (МИУ) состоит в замене мощного однократного силового воздействия серией довольно малых импульсов, суммарное действие которых

должно быть достаточным для достижения заданного уровня деформирования объекта обработки, т.е. выравнивания вмятины, находящейся на кузове автомобиля.

### Цель и постановка задачи

Анализ протекания электромагнитных процессов в магнитно-импульсной установке с последующим предложением схемотехнического решения её исполнения, как источника мощности для ремонтного комплекса.

### Магнитно-импульсная установка

Конкретная техническая реализация предлагаемой идеи может осуществляться с помощью принципиальной схемы МИУ для работы в режиме многократно повторяющихся импульсов силового воздействия, приведенной на рис. 1, где  $R_1$  – токоограничивающий резистор зарядного контура,  $R_2, L_2$  – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность разрядного контура.

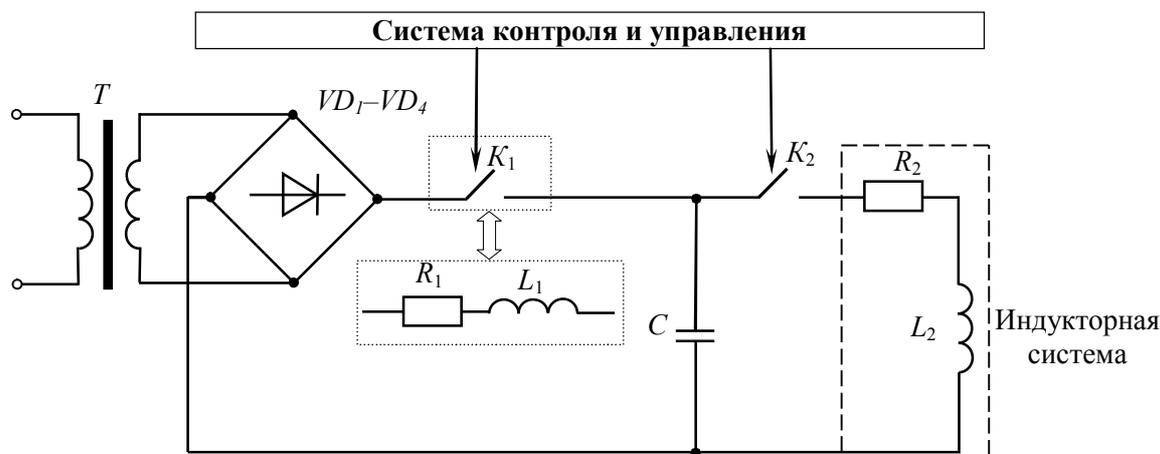


Рис. 1. Принципиальная схема МИУ

Как представляется из практических соображений, ключ  $K_1$  можно заменить последовательно включёнными индуктивным и активным элементами. Это позволит уменьшить затраты на систему управления МИУ.

Включение дополнительных элементов в зарядный контур МИУ (дополнительной индуктивности  $L_1$  и резистора  $R_1$ ) должны ограничить протекание разрядного тока вне разрядной цепи (инструмент-индуктор,  $L_2, R_2$ ).

Смысл данного предложения можно оценить

с помощью простейших вычислений.

### Расчет переходных процессов в МИУ

Подробный расчет электромагнитных процессов в МИУ был проведен в авторских работах [11-13], не останавливаясь на самом ходе решения, запишем окончательные выражения для тока, который протекает в разрядном контуре МИУ.

$$\text{При } \sqrt{\frac{4 \cdot (R_1 L_2 + R_2 L_1)}{C}} > \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1 + R_2}},$$

$$i_2(\varphi) \approx -\frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \times \left( \cos(\varphi) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \sin(\varphi) \right), \quad (8)$$

$$\text{При } \sqrt{\frac{4 \cdot (R_1 L_2 + R_2 L_1)}{C}} < \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1 + R_2}},$$

$$i_2(\varphi) \approx -\frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \times \left( \operatorname{ch}(\varphi) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \operatorname{sh}(\varphi) \right). \quad (9)$$

где  $\delta_0 = \frac{\delta}{\omega}$  – относительный декремент затухания разрядного тока,  
 $\varphi = \omega \cdot t$  – фаза сигнала.

Количественно характеризовать протекающие процессы можно с помощью средней энергии магнитного поля, поступающей обмотку индукторной системы за период разрядного тока.

По определению, данный энергетический показатель определяется соотношением:

$$\overline{W} = \frac{L_2}{2} \cdot \left( \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i_2^2(\varphi) \cdot d\varphi \right). \quad (10)$$

Сравнение значений  $\overline{W}$  при вариации величин элементов схемы на рис. 1 позволит провести количественное сравнение эффективности передачи энергии емкостного накопителя в обмотку индукторной системы.

### Численные оценки

В качестве параметров схемы возьмём их типичные значения [1]:  $C = 1200 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_2 = 0,02094$  Ом,  $L_2 = 6 \cdot 10^6$  Гн,  $U_{c0} = 1$  кВ. Величины  $R_1$  и  $L_1$  варьируются.

Результаты вычислений представлены ниже: расчётная фазовая зависимость для разрядного тока при работе коммутатора  $K_1$ ,  $f = 1855$  кГц,  $\delta_0 = 0,149$  (рис. 2,а); расчётная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора  $K_1$ ,  $R_1 = R_2$ ,  $L_1 = 0$ ,  $f = 2196$  Гц,  $\delta_0 = 1,57$  (рис. 2,б).

Представленные кривые характеризуют процесс разряда в двух «предельных» ситуациях.

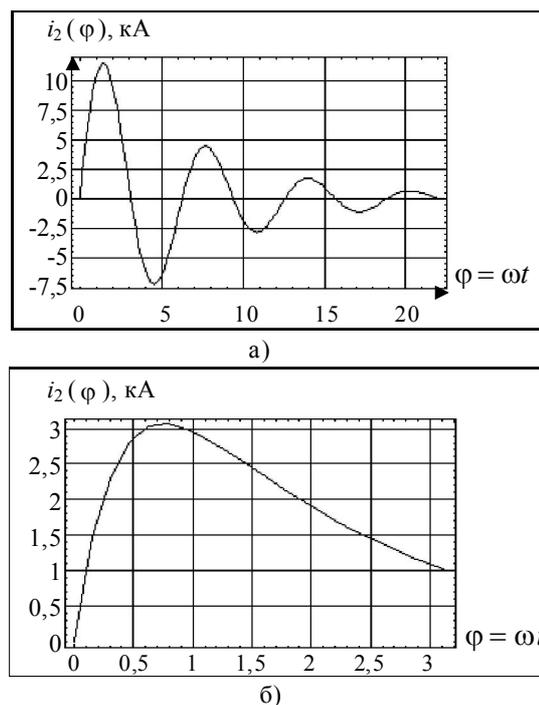


Рис. 2. Расчётная фазовая зависимость для разрядного тока: а – при работе коммутатора  $K_1$ ; б – в отсутствие  $K_1$

Первая – коммутатор  $K_1$  полностью отключает цепь заряда. Энергия, передаваемая в нагрузку – максимальна, т.к. ёмкость разряжается исключительно на обмотку индукторной системы. Процесс имеет колебательный характер. Вычисления по формуле (10) дают, что  $\overline{W} = 135$  Дж.

Вторая – коммутатор  $K_1$  отсутствует (рис. 1). Разряд происходит на два параллельных контура, один из которых – ветвь с подключённой индукторной системой, а второй – ветвь, с элементами  $R_1$ ,  $L_1$ , значения которых являются наименьшими из реально возможных. Процесс имеет строго аperiodический характер. Вычисления по формуле (10) дают, что  $\overline{W}_2 = 3$  Дж.

Сравнение результатов показывает, что полное отключение элементов зарядной цепи (наличие коммутатора  $K_1$ ) существенно увеличивает эффективность передачи энергии в нагрузку. Так, отношение энергетических показателей составляет  $\overline{W}_2 / \overline{W}_1 \approx 0,022$ . То есть, в отсутствие коммутатора  $K_1$ , в цепь обмотки индукторной системы поступает менее 3% максимально возможной энергии.

Далее, проанализируем влияние сопротивления  $R_1$ . Ниже представлены расчётные фазовые зависимости для разрядного тока в отсутствие коммутатора  $K_1$ :  $R_1=10 \cdot R_2$ ,  $L_1=0$ ,  $f=2196$  Гц,  $\delta_0=0,32$  и  $R_1=500 \cdot R_2 \approx 10,94$  Ом,  $L_1 \approx 0$ ,  $f=1856$  Гц,  $\delta_0=0,15$ , рис.3.

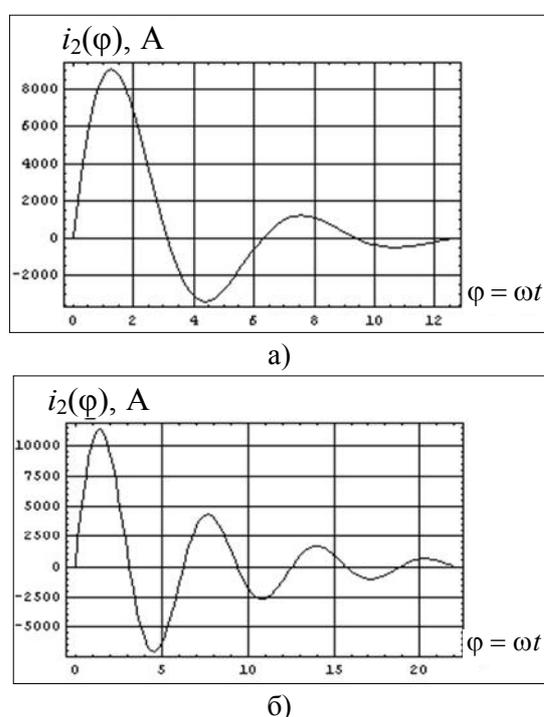


Рис. 3. Фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора  $K_1$ : а – при  $R_1=10 \cdot R_2=0,2094$  Ом,  $L_1=0$ ,  $f=2196$  Гц,  $\delta_0=0,32$ ; б – при  $R_1=500 \cdot R_2 \approx 10,94$  Ом,  $L_1 \approx 0$ ,  $f=1856$  Гц,  $\delta_0=0,32$

Как следует из представленных выше результатов вычислений, увеличение сопротивления в зарядном контуре приближает характеристики процесса в контуре с индукторной системой к ситуации, когда имело место отключение левой ветви на схеме рис. 1 с помощью коммутатора  $K_1$ .

Так уже при  $R_1=10 \cdot R_2=0,2094$  Ом процесс приобретает колебательный характер. Энергетический показатель  $\overline{W}_3 = 67$  Дж, что со-

ставляет  $\sim 50\%$  от возможного максимума.

При  $R_1=500 \cdot R_2 \approx 10,47$  Ом колебательный характер процесса сохраняется. Энергетический показатель приближается к «идеалу» и составляет  $\overline{W}_4=133$  Дж, то есть, уже около 99% от максимума возможного.

Физически, резистор  $R_1$ , в какой-то мере, играет роль коммутатора  $K_1$ . Варьируя  $R_1$  в схеме рис. 1, можно подобрать такую величину сопротивления, при которой происходит эффективное отключение левой ветви схемы. Этот факт и определяет значение энергии, передаваемой в обмотку индукторной системы. Очевидно, что значение  $R_1=10,47$  Ом по действительности эквивалентно работе коммутатора  $K_1$ . Т.е., выбирая резистор  $R_1$  сопротивлением равным и более 10, 47 Ом, мы, фактически, разрываем левую цепь схемы (рис. 1), что эквивалентно действию коммутатора  $K_1$ .

В рассматриваемой схеме, данному значению  $R_1=10,47$  Ом соответствует постоянная заряда  $\tau = R_1 \cdot C \approx 0,12$  с. Это означает, что в режиме многократного повторения разрядных импульсов источник мощности может работать с частотой  $\sim 1/3 \tau \approx 3$  Гц. При желании увеличить частоту повторения в 4 раза, то есть, довести до 12 Гц, необходимо взять  $R_1 \approx 2,6$  Ом. В этом случае придётся несколько пожертвовать величиной энергии, передаваемой в обмотку индукторной системы. Энергетический показатель составит  $\overline{W}=126$  Дж. В процентах это около 95% от максимума возможного.

### Анализ схемных решений разрядного контура

Необходимо исследовать характеристики разрядного сигнала при разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура. Схема электрическая принципиальная установки с неразветвленным разрядным контуром представлена на рис. 4.

**Начальные условия.** Суммарная ёмкость группы конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  – 1200 мкФ. Конденсаторы заряжаются до напряжения 1500 В:

а) измерение сигнала в разрядной ветви с разветвленной цепью разрядного контура проводилось индукционным датчиком – поя-

сом Роговского. Коммутаторы  $K_1$  и  $K_2$  замкнуты (рис. 4,а), сигнал поступает с датчика  $PP$  (осциллограмма рис. 5);

б) измерение сигнала в разрядной ветви с неразветвленной цепью разрядного контура проводилось индукционным датчиком – поясом Роговского. Один коммутатор замкнут (рис. 4,б), сигнал поступает с датчика  $PP$  (осциллограмма рис. 5).

**Целью анализа схемных решений** – выяснить соответствие характеристик полученных сигналов в разрядном контуре при неразветвленной разрядной цепи (один разрядный тиристор) и при разветвленной разрядной цепи (два разрядных тиристора, включенные в параллельные ветви).

Экспериментальные результаты – осциллограммы по третьему этапу исследований представлены на рис. 4.

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 1. где  $I_{m1}$  – амплитудное значение первой полуволны разрядного тока на выходе МИУ;  $I_{m2}$  – амплитудное значение первой полуволны разрядного тока в индукторе;  $\Delta I_{1 \text{ потеря}}$  – разница в амплитудных значениях первой полуволны импульса разрядного тока разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура на выходе с МИУ;  $\Delta I_{2 \text{ потеря}}$  – разница в амплитудных значениях первой полуволны импульса разрядного тока разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура, протекающего по индуктору.

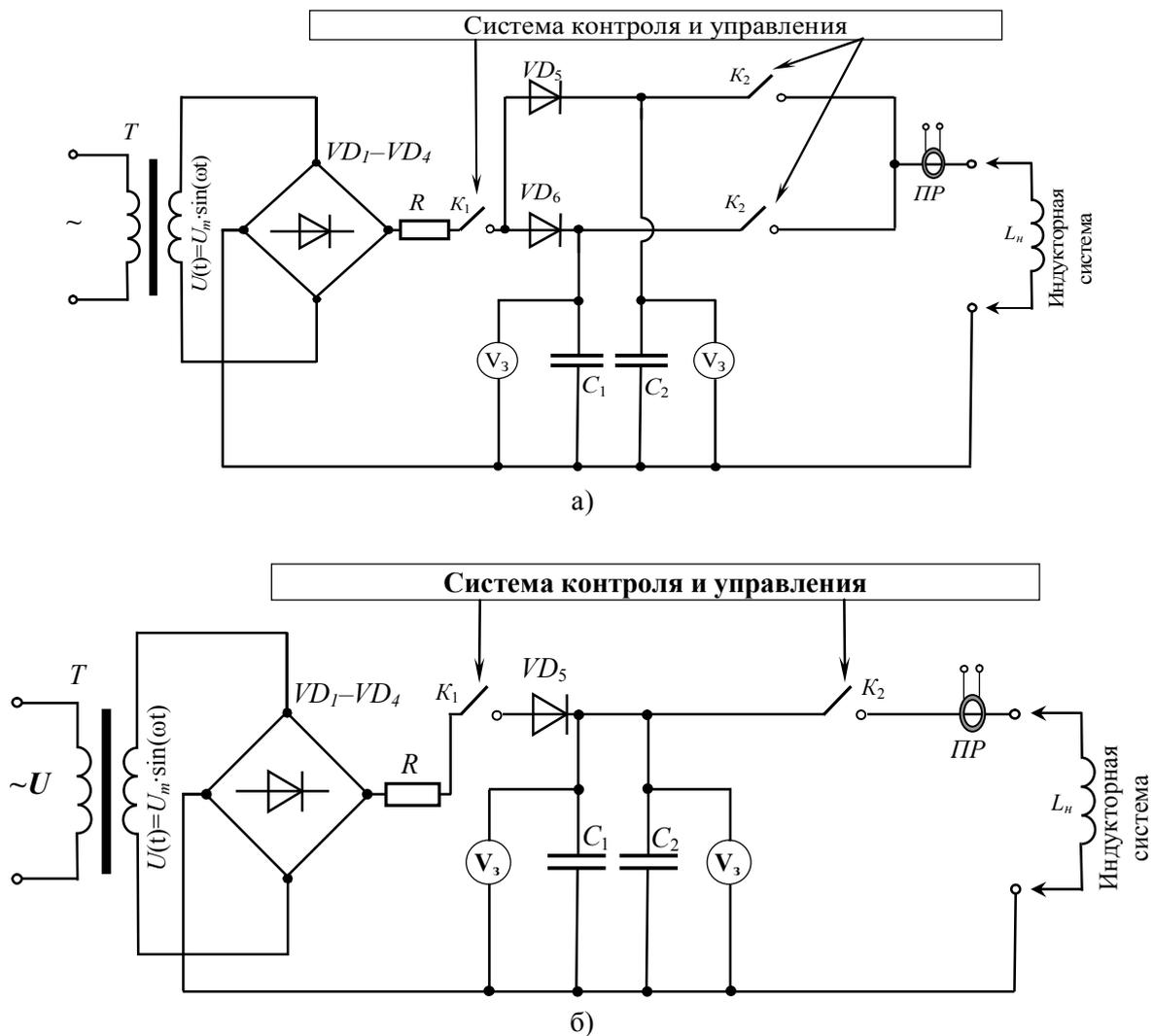


Рис. 4. Схема МИУ: а – с разветвленным разрядным контуром; б – с неразветвленным контуром ( $V_3$  – Вольтметр, показывающий уровень заряда конденсаторов,  $PP$  – Пояс Роговского)

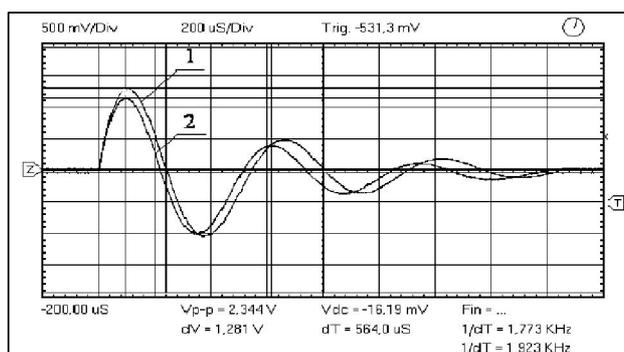


Рис. 5. Совмещённая осциллограмма токовых импульсов: 1 – неразветвленная цепь:  $f=1,773$  кГц,  $I_m=7535$  А; 2 – разветвленная цепь:  $f=1,923$  кГц,  $I_m=6890$  А

Таблица 3

Результаты № п/п	$U_{зар}$ , В	C, мкФ	$f$ , кГц	$I_{m1}$ , А	$\Delta I_1$ потеря, А, %	$I_{m2}$ , А	$\Delta I_2$ потеря, А, %	Осцилло- грамма
1.	1500	1200	1,923	6890	645 А	34450	3225 А	рис. 5
2.	1500	1200	1,773	7535	или 8,5 %	37675	или 8,5 %	рис. 5

### Комментарии

Проведенные экспериментальные исследования переходных процессов в разрядном контуре МИУ показали:

1. Установка работает адекватно во всех исследованных режимах.
2. Потери в амплитудных значениях токового импульса с разветвленной цепью разрядного контура составляют 8,5% по сравнению с неразветвленной. Данное снижение эффективности может быть компенсировано, увеличением ёмкости конденсаторных батарей.
3. Причина наблюдаемых потерь, кроется в конструктивной и схемотехнической реализации МИУ. В данной конструктивной реализации наблюдается магнитная связь между параллельными ветвями в разрядном контуре, что и обуславливает снижение амплитудного значения токового импульса и увеличение его частоты.
4. Деление разрядной цепи на две параллельные ветви с электронным ключом в каждой приводит к снижению значения разрядного тока протекающего по каждой из ветвей в два раза, что существенно снижает вероятность электрического пробоя разрядного тиристора и увеличивает надежность источника мощности и значительно продляет его работоспособность.
5. Электротехнические характеристики в параллельных ветвях разрядного контура установки идентичны. Наблюдается небольшой разброс во времени включения разрядных тиристоров, но это несоответствие не оказы-

вает существенного влияния на протекающие процессы в разрядном контуре установки (т.к. время включения тиристора имеет порядок микросекунд, а протекающие процессы в разрядном контуре имеют порядок миллисекунд).

6. Электромагнитная связь между отдельными разрядными цепями приводит к снижению амплитуды тока в нагрузке и повышению его рабочей частоты.

7. Для увеличения эффективности МИУ при использовании схем с несколькими разрядными контурами необходимо устранить либо снизить до минимума электромагнитную связь между ними, что может быть достигнуто экранированием или взаимно-ортогональным расположением токопроводов от емкостных накопителей к нагрузке.

### Схемное решение

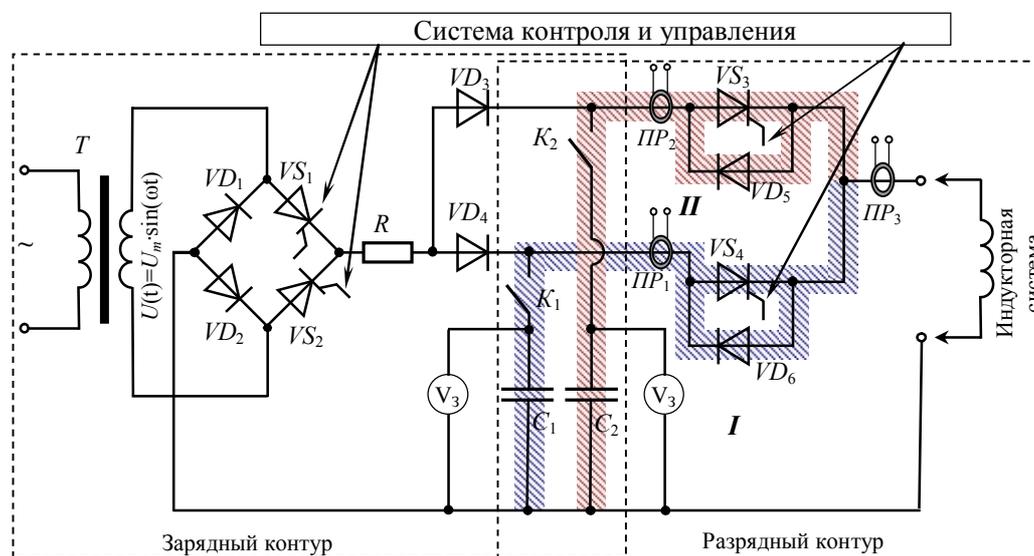
Проведенные исследования позволяют сформировать и предложить конкретное схемное решения электрической части МИУ, представленное на рис. 6. Также, проведенные исследования позволяют задаться основными техническими характеристиками МИУ, как источника мощности для ремонтного комплекса основанного на использовании энергии импульсных магнитных полей.

Основные характеристики редложенной МИУ:

- работа от 3-х фазной сети  $\sim 220/380$  В;
- трансформатор Т380/2000 – 11кВт (мощ-

ность одной фазы 3,3 кВт);  
 - зарядное напряжение до 2 кВ, запасаемая энергия до 2 кДж,  
 - собственная частота в импульсе 7 кГц, в комплекте с согласующими устройствами – импульсными трансформаторами 1...2 кГц, собственная индуктивность 450 нГн;

- частота повторения разрядных импульсов 10 Гц;  
 - емкость запасаемой энергии  $C_1 = C_2 = 600$  мкФ ( $C_{\Sigma} = 1200$  мкФ);  
 - зарядное сопротивление  $R_3 = 13$  Ом ( $P = 400$  Вт);



$V_3$  – вольтметр, показывающий уровень заряда конденсаторов,  $PP$  – пояс Роговского,  $K_1$  и  $K_2$  – механические коммутаторы.

Рис. 6. Схема электрическая принципиальная МИУ

### Алгоритм работы МИУ

Системой контроля и управления (рис. 5), вручную, задается уровень напряжения, на которое будут заряжаться конденсаторы. Заданный уровень напряжения отслеживает электроника (вольтметр  $V_3$ ).

Система контроля и управления дает команду на открытие электронных ключей – тиристоров  $VS_1$ – $VS_3$  в зарядном контуре. При достижении напряжения на конденсаторах заданного уровня, система управления даёт команду на отключение тиристоров  $VS_1$ – $VS_3$ . После отключения электронных ключей в зарядном контуре, система управления дает команду на включение тиристоров в разрядном контуре  $VS_4$  и  $VS_5$ . Тиристоры  $VS_4$  и  $VS_5$  закрываются после полного разряда конденсаторных батарей. После закрытия электронных ключей в разрядном контуре, система управления даёт команду на открытие тиристоров  $VS_1$ – $VS_3$  и цикл работы повторяется заданное количество раз.

### Выводы

1. Проведен анализ протекания электромагнитных процессов в магнитно-импульсной установке с последующим предложением схемотехнического решения её исполнения, как источника мощности для ремонтного комплекса.
2. Определено, что выбор токоограничивающего сопротивления обеспечивает требуемую частоту разрядных импульсов и величину потребляемой энергии.
3. Сформулировано предложение по замене ключа в зарядной цепи соответствующими резистором и индуктивностью, что позволяет существенно снизить стоимость элементной базы зарядного устройства.
4. Показано, что для увеличения эффективности МИУ при использовании схем с несколькими разрядными контурами необходимо устранить либо снизить до минимума электромагнитную связь между ними, что может быть достигнуто экранированием или

взаимно-ортогональным расположением токопроводов от емкостных накопителей к нагрузке.

5. Предложено схемное решение МИУ. Представлены технические характеристики и алгоритм работы МИУ.

### Список литературы

1. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хищенко Л. Т. – Т. 1.; под ред. проф. Ю. В. Батыгина. – [2-е изд.] – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
2. Белый И. В. Установка для магнитноимпульсной формовки металлов / И. В. Белый // Обработка металлов энергией взрыва: Сб. статей. – К.: ИТИ, – 1965. – С. 33–35.
3. Белый И. В. Справочник по магнитноимпульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хищенко. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
4. Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: [http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/34241\\_ElectDentRemoval04-05.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf).
5. Electromagnetic Dent Removal [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: <https://www.electroimpact.com/Products/Specialty/EDR/Overview.aspx>
6. Батыгин Ю. В., Бондаренко А. Ю., Гнатов А. В., Сериков Г. С., Чаплигин Е. А. Пат. 44933 Украины, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів – заявитель и патентообладатель Харьковский нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200903072 заявл. 01.04.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. №20.
7. Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигин Е. А., Гнатова Щ. В., Трунова И. С. Пат. 61417 Украины, В21 Д 26/14. Генератор багатократних імпульсів струму для обробки металів тиском імпульсного магнітного поля – заявитель и патентообладатель Харьковский нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2010 13096 ; заявл. 04.11.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
8. Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигин Е. А., Воробйов В. В. Пат. 61088 Украины, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів з розгалуженим колом комутуючих пристроїв – заявитель и патентообладатель Харьковский нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2010 12932 заявл. 01.11.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.
9. Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Чаплигин Е. А., Дзюбенко А. А., Дробинин А. М Пат. 73733 Украины, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів – заявитель и патентообладатель Харьковский нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2012 02178 заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
10. Особенности системы управления магнитно-импульсной установки при работе в униполярном режиме / А. А. Дзюбенко, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, Е. Ф. Еремина, // Автомобильный транспорт. – Х. : ХНАДУ. – 2012. – Вып. 31. – С. 147–152.
11. Батыгин Ю. В., Гнатов А. В. Теория и эксперимент магнитно – импульсного притяжения / отталкивания тонкостенных листовых ферромагнетиков. / Электричество. – М.: – 2012. – № 8. – С. 58–65.
12. Расчётные характеристики магнитноимпульсной установки для обработки металлов серией импульсов / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, В. В. Воробьёв [и др.] // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2011. – № 12. – С. 86–95.
13. Аргун Щ. В. Разработка магнитноимпульсной установки для внешней бесконтактной рихтовки автомобильных кузовов : дисс. ... кандидата техн. наук : 05.22.20 / Аргун Щасяна Валиковна. – Х., 2014. – 160 с.

Рецензент Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редколлегию 20.04.2015