

Ю.В. Батыгин, В.В. Воробьёв, А.В. Гнатов, Щ.В. Гнатова, Е.Ф. Ерёмина

ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ В ЦЕПИ НАГРУЗКИ

В рамках статті проведено аналіз перехідного процесу в розрядному контурі магнітно-імпульсного комплексу при короткому замиканні на затискачах підключення навантаження. Отримані розрахункові співвідношення для аналізу часової залежності напруги на накопичувачі електричної енергії і струму в розрядному контурі при різній початковій фазі моменту короткого замикання. Проілюстровано для конкретних значень початкової фази моменту короткого замикання часову залежність напруги, струму і швидкості зміни струму в розрядному контурі.

В рамках статьи проведен анализ переходного процесса в разрядном контуре магнитно-импульсного комплекса при коротком замыкании на выводах подключения нагрузки. Получены расчетные соотношения для анализа временных зависимостей напряжения на ёмкостном накопителе энергии и тока в разрядном контуре при различной начальной фазе момента короткого замыкания. Проиллюстрированы для конкретных значений начальной фазы момента короткого замыкания временные зависимости напряжения, тока и скорости изменения тока в разрядном контуре.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы.

Магнитно-импульсные технологии, зародившиеся в 60-х прошлого столетия, приобретают всё большую значимость для современного обрабатывающего производства в разных отраслях промышленности [1, 2].

Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает исключительные перспективы для создания прогрессивных технологий по обработке материалов любой физической природы. Здесь возможно комплексное сочетание всех атрибутов, определяющих прогрессивность технических решений различных производственных задач, а именно, экологическая чистота, высокая производительность, экономия материальных и энергетических ресурсов.

Переход к новым прогрессивным технологиям в обрабатывающей промышленности будет не эффективен, если не будут предусмотрены и просчитаны все наиболее вероятные аварийные режимы работы соответствующего оборудования.

Анализ основных достижений и публикаций.

В комплексе технического оборудования магнитно-импульсной обработке металлов можно выделить две основные составляющие. Это источник мощности и индукторная система.

Источником мощности является магнитно-импульсная установка (МИУ), представляющая собой высоковольтное электротехническое устройство (~1 кВ и выше) с соответствующим набором необходимых компонент, к которым относятся импульсные конденсаторы, коммутаторы, системы автоматики, контроля, и др.

Индукторная система – это инструмент метода, предназначенный для выполнения конкретного производственного задания. В общем случае она включает согласующий трансформатор и собственно индуктор с обрабатываемой заготовкой. Индукторную систему можно рассматривать как нагрузку, подключаемую к электрическому выходу источника мощности [3].

Работа магнитно-импульсного комплекса в целом иллюстрируется схемой на рис. 1. Здесь же с помощью введения "условного" коммутатора K_2 показана возможность возникновения аварийного режима, обусловленного электрическим пробоем в нагрузке. Очевидно, что наиболее опасным для элементов разрядного контура (в частности для электронных систем

управления [4]) является короткое замыкание на выходе МИУ. В этом случае имеет место переходной процесс и, соответственно, экстремальное изменение параметров тока в контуре.

Работоспособность МИУ устанавливается тем, что установка должна нормально выдерживать короткое замыкание на выходе из источника мощности. Т.е. режим короткого замыкания для МИУ должен быть одним из номинальных режимов её работы.

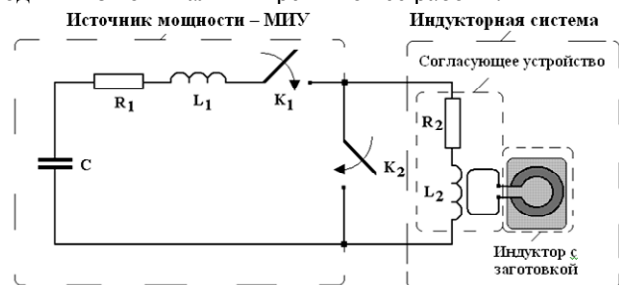


Рис. 1 Принципиальная схема магнитно-импульсного комплекса, C – батарея емкостных накопителей энергии, R_1, L_1 – собственные активное и индуктивное сопротивления МИУ, K_1 – коммутатор разрядного контура МИУ, R_2, L_2 – собственные "эквивалентные" активное и индуктивное сопротивления нагрузки (индукторной системы в целом), K_2 – "условный" коммутатор, имитирующий электрический пробой на выходе МИУ (к подключённой нагрузке)

Цель настоящей работы – анализ переходного процесса в разрядном контуре магнитно-импульсного комплекса любого назначения при коротком замыкании на клеммах подключения нагрузки.

ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ

Итак, при включении коммутатора – K_1 ёмкость – C , предварительно заряженная до напряжения U_{c0} , разряжается. По цепи " $(R_1 + R_2) - (L_1 + L_2) - C$ " протекает ток – $J_1(t)$.

В терминах напряжения на ёмкости – $U_{c1}(t)$ процесс описывается дифференциальным уравнением и соотношением $J_1(t) = C \cdot \frac{dU_{c1}(t)}{dt}$ [5]:

$$\frac{d^2 U_{c1}(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta_1 \cdot \frac{dU_{c1}(t)}{dt} + \omega_{10}^2 \cdot U_{c1}(t) = 0, \quad (1)$$

где t – время, δ_1 и ω_{10} – декремент затухания и собственная частота колебаний в контуре с подключённой нагрузкой

$$\delta_1 = \frac{(R_1 + R_2)}{2 \cdot (L_1 + L_2)}, \quad \omega_{10} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2) \cdot C}}.$$

Уравнению (1) в колебательном режиме (при $\omega_{10} > \delta_1$) при начальных условиях $\{U_{c1}(0) = U_{c0}, \frac{dU_{c1}(0)}{dt} = 0\}$ удовлетворяет функция [6]:

$$U_{c1}(t) = U_{c0} \cdot e^{-\delta_{10} \cdot \omega_1 t} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t), \quad (2)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_{10}^2 - \delta_1^2}$, δ_{10} – относительный декремент затухания, $\delta_{10} = \delta_1 / \omega_1$.

Разрядный ток и запишется в виде:

$$J_1(t) = -U_{c0}(\omega_1 C) \cdot (1 + \delta_{10}^2) e^{-\delta_{10}(\omega_1 t)} \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (3)$$

Пусть в момент времени $t = t_0$ происходит электрический пробой на выходе магнитно-импульсной установки, что эквивалентно включению "условного" коммутатора K_2 . Переходный процесс будет описываться тем же, что и ранее, уравнением (1), но с другими коэффициентами и неизвестной функцией – $U_{c2}(t)$ [5]:

$$\frac{d^2 U_{c2}(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta_2 \cdot \frac{dU_{c2}(t)}{dt} + \omega_{20}^2 \cdot U_{c2}(t) = 0, \quad (4)$$

где δ_2 и ω_{20} – декремент затухания и собственная частота колебаний в короткозамкнутом контуре собственно магнитно-импульсной установки

$$\delta_2 = \frac{R_1}{2 \cdot L_1}, \quad \omega_{20} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C}}.$$

Уравнение (4) следует проинтегрировать при начальных условиях:

$$\{U_{c2}(t_0) = U_{c1}(t_0), J_2(t_0) = J_1(t_0)\}, \quad (5)$$

где $J_2(t)$ – ток после "условной" коммутации.

Запишем начальные значения напряжения на ёмкостном накопителе энергии и разрядного тока в момент "условной" коммутации – $t = t_0$.

$$\begin{cases} U_{c1}(t_0) = U_{c0} \cdot e^{-\delta_{10} \cdot \omega_1 t_0} \cos(\omega_1 t_0), \\ J_1(t_0) = -U_{c0}(\omega_1 C)(1 + \delta_{10}^2) e^{-\delta_{10}(\omega_1 t_0)} \sin(\omega_1 t_0). \end{cases} \quad (6)$$

Общий интеграл уравнения (4) и ток в контуре для колебательного режима (при $\omega_{20} > \delta_2$) имеет вид [6]:

$$\begin{cases} U_{c2}(t) = e^{-\delta_{20}(\omega_2 t)} [A \cos(\omega_2 t) + B \sin(\omega_2 t)], \\ J_2(t) = C \frac{dU_{c2}(t)}{dt} = -(\omega_2 C) e^{-\delta_{20}(\omega_2 t)} \times \\ \times \{A[\sin(\omega_2 t) + \delta_{20} \cos(\omega_2 t)] + B[\delta_{20} \sin(\omega_2 t) - \cos(\omega_2 t)]\}, \end{cases} \quad (7)$$

где A, B – постоянные интегрирования,

$$\omega_2 = \sqrt{\omega_{20}^2 - \delta_2^2}, \quad \delta_{20} = \frac{\delta_2}{\omega_2}.$$

Из начальных условий (5) с помощью выражений (7) получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных произвольных постоянных интегрирования A, B .

$$\begin{cases} A \cdot \cos(\omega_2 t_0) + B \cdot \sin(\omega_2 t_0) = \alpha, \\ A[\sin(\omega_2 t_0) + \delta_{20} \cos(\omega_2 t_0)] + \\ + B[\delta_{20} \sin(\omega_2 t_0) - \cos(\omega_2 t_0)] = \alpha k. \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\alpha = U_{c0} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t_0) \cdot e^{-(\delta_{10} \omega_1 - \delta_{20} \omega_2) t_0},$$

$$k = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot (1 + \delta_{10}^2) \cdot \operatorname{tg}(\omega_1 \cdot t_0).$$

Определитель системы (8) – $\Delta = -1 \neq 0$, что говорит о её совместности.

Теперь находим, что

$$\begin{cases} A = \alpha \cdot (\cos(\omega_2 t_0) - \sin(\omega_2 t_0) \cdot (\delta_{20} - k)), \\ B = \alpha \cdot (\sin(\omega_2 t_0) + \cos(\omega_2 t_0) \cdot (\delta_{20} - k)) \end{cases} \quad (9)$$

Значения произвольных постоянных интегрирования A, B из (9) следует подставить в выражения (7). Получим соотношения для расчётов напряжения на ёмкости и тока в контуре после условной коммутации

$$U_{c2}(t) = U_{c0} \cdot \cos(\omega_1 t_0) \cdot e^{-\delta_{10} \omega_1 t_0} \times \\ \times [e^{-\delta_{20} \omega_2 (t-t_0)} (\cos(\omega_2 (t-t_0)) + (\delta_{20} - k) \sin(\omega_2 (t-t_0)))] \quad (10)$$

$$J_2(t) = -U_{c0}(\omega_2 C) \cdot \cos(\omega_1 t_0) \cdot e^{-\delta_{10} \omega_1 t_0} \times \\ \times [e^{-\delta_{20} \omega_2 (t-t_0)} \cdot (k \cos(\omega_2 (t-t_0)) + \\ + (1 + \delta_{20}(\delta_{20} - k)) \sin(\omega_2 (t-t_0)))] \quad (11)$$

Сгруппируем выражения для напряжений и токов до и после момента "условной" коммутации $t = t_0$. Соответственно, (2), (10) и (3), (11). Получим зависимости, описывающие процессы в разрядном контуре магнитно-импульсной установки в непрерывном временном представлении.

Далее, для удобства в вычислениях перейдём к относительным единицам. Нормой для тока примем его первый максимум, $J_N = J_{1\max}(t_{\max})$. Приравняв к нулю результат дифференцирования выражения (3), определяем момент времени – t_{\max} , соответствующий максимуму исследуемой функции – $J_1(t)$:

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right).$$

Теперь,

$$J_N = -U_{c0}(\omega_1 C)(1 + \delta_{10}^2) e^{-\delta_{10} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)} \sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right).$$

Для напряжения на ёмкостном накопителе возьмём норму – $U_N = U_{c0}$. Итак

$$U_{\text{сотн}}(t) = \begin{cases} e^{-\delta_{10} \omega_1 t} \cdot \cos(\omega_1 t), & t \in [0, t_0], \\ \cos(\omega_1 t_0) \cdot e^{-\delta_{10} \omega_1 t_0} \cdot [e^{-\delta_{20} \omega_2 (t-t_0)} \times \\ \times (\cos(\omega_2 (t-t_0)) + (\delta_{20} - k) \sin(\omega_2 (t-t_0)))] & t \in [t_0, \infty) \end{cases} \quad (12)$$

где $U_{\text{сотн}}(t) = \frac{U_c(t)}{U_N}, U_N = U_{c0}$.

$$J_{\text{отн}}(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\delta_{10} \left(\omega_1 t - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}}{\sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)} \cdot \sin(\omega_1 t), & t \in [0, t_0], \\ \frac{\omega_2 \cdot \cos(\omega_1 t_0) \cdot e^{-\delta_{10} \left(\omega_1 t_0 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}}{\omega_1 (1 + \delta_{10}^2) \sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)} \times \\ \times [e^{-\delta_{20} \omega_2 (t-t_0)} (k \cos(\omega_2 (t-t_0)) + \\ + (1 + \delta_{20}(\delta_{20} - k)) \sin(\omega_2 (t-t_0)))] & t \in [t_0, \infty) \end{cases} \quad (13)$$

где

$$J_{отн}(t) = \frac{J(t)}{J_N},$$

$$J_N = -U_{c0}(\omega_1 C) \cdot (1 + \delta_{10}^2) \cdot e^{-\delta_{10} \cdot \arctg(\frac{1}{\delta_{10}})} \times \sin(\arctg(\frac{1}{\delta_{10}})).$$

Для практических целей представляет интерес динамическая характеристика "условной" коммутации – электрического пробоя на выходе магнитно-импульсной установки. Такой динамической характеристикой может служить первая производная разрядного тока.

Дифференцируя (13) и переходя к относительным единицам, находим, что

$$j_{отн}(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\delta_{10}(\omega_1 t - \arctg(\frac{1}{\delta_{10}}))}}{\sin(\arctg(\frac{1}{\delta_{10}}))} \times [\cos(\omega_1 t) - \delta_{10} \sin(\omega_1 t)], & t \in [0, t_0], \\ \frac{\omega_2 \cos(\omega_1 t_0)}{\omega_1 (1 + \delta_{10}^2)} \cdot \frac{e^{-\delta_{10}(\omega_1 t_0 - \arctg(\frac{1}{\delta_{10}}))}}{\sin(\arctg(\frac{1}{\delta_{10}}))} \times e^{-\delta_{20}\omega_2(t-t_0)} \left[(1-k^2) + (\delta_{20}-k)^2 \right] \times \cos(\omega_2(t-t_0)) + ((1-k) + \delta_{20}(\delta_{20}-k)) \times \sin(\omega_2(t-t_0)), & t \in [t_0, \infty), \end{cases} \quad (14)$$

где $\dot{J}_{отн}(t) = \frac{\dot{J}(t)}{J_N}$, $\dot{J}_N = J_N \omega_1$.

С практической точки зрения представляет интерес оценка скорости изменения тока в разрядном контуре в момент "условной" коммутации – $\Delta \dot{J}_{отн}(t_0)$.

Подставляя $t = t_0$ в первое и второе выражения из (14), вычисляя отношение полученных величин и рас-

крывая ранее введенные обозначения (k из формулы (8)), находим, что

$$\Delta \dot{J}_{отн}(t_0) = \frac{\left[\frac{\omega_2 \cos(\omega_1 t_0)}{\omega_1} \frac{1 + \delta_{20}^2}{1 + \delta_{10}^2} - 2\delta_{20} \sin(\omega_1 t_0) \right]}{(\cos(\omega_1 t_0) - \delta_{10} \sin(\omega_1 t_0))}. \quad (15)$$

Первое, что следует из зависимости (14), это физически очевидный результат при $t_0 \rightarrow 0$, то есть, соотношение, когда электрический пробой на выходе магнитно-импульсной установки ("условная" коммутация) происходит практически сразу после включения разрядного контура.

Итак, при $t_0 \rightarrow 0$ получаем

$$\Delta \dot{J}_{отн}(t_0) \Big|_{t_0 \rightarrow 0} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{(1 + \delta_{20}^2)}{(1 + \delta_{10}^2)} \Big|_{(\delta_{20}, \delta_{10}) \ll 1} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (16)$$

Очевидность и, соответственно, подтверждение достоверности полученного результата состоят в том, что отношения первых динамических характеристик для квазигармонических процессов должны быть равны отношению их частот.

Аналитические результаты проиллюстрируем численными оценками для характерных частот и относительных декрементов затухания реального токового импульса при магнитно-импульсной обработке металлов [3]:

- до "условной" коммутации: $f_1 = 2$ кГц, $\delta_1 = 0,5$;
- после "условной" коммутации: $f_1 = 10$ кГц, $\delta_1 = 0,2$;
- момент "условной" коммутации варьируется: $t_0 = \pi/16 \cdot \omega_1$; $\pi/4 \cdot \omega_1$; π/ω_1 .

Выбор расчётных моментов "условной" коммутации в течение первой полуволны разрядного тока на нагрузку ($\omega_1 \cdot t_0 \in [\pi/16, \pi]$) позволяет оценить возможный диапазон характерных значений параметров переходного процесса при электрическом пробое на выходе источника мощности.

Результаты расчётов приведены ниже на рис. 2-4.

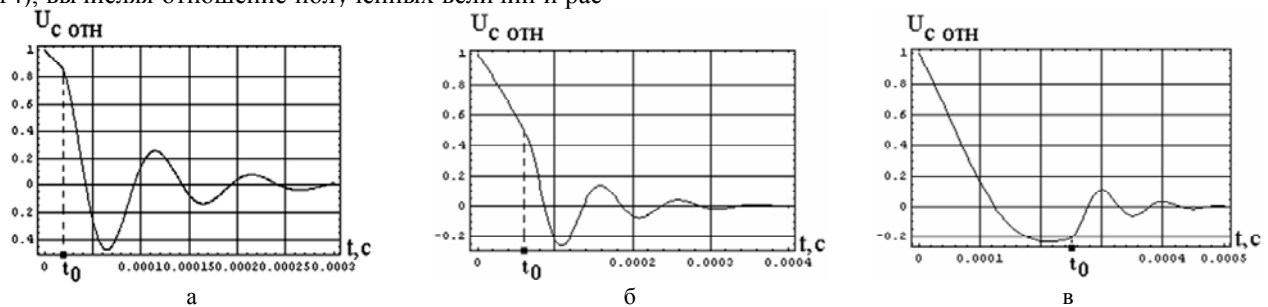


Рис. 2. Напряжение на ёмкостном накопителе энергии при различных значениях момента "условной" коммутации
а – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/16$; б – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/4$; в – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi$

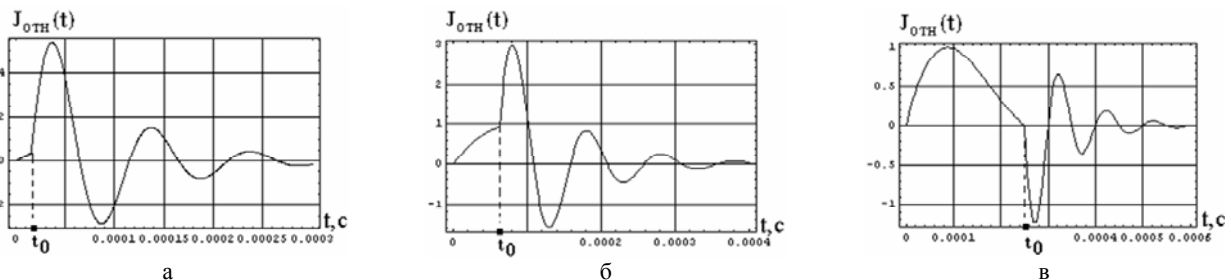


Рис. 3. Временные зависимости тока в разрядном контуре при различных значениях момента "условной" коммутации
а – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/16$; б – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/4$; в – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi$

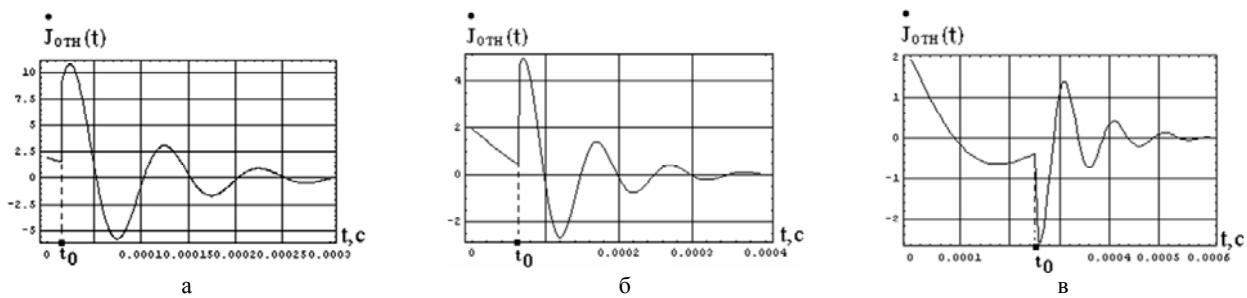


Рис. 4. Временные зависимости скорости изменения тока в разрядном контуре при различных значениях момента "условной" коммутации а – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/16$; б – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi/4$; в – $\omega_1 \cdot t_0 = \pi$

ВЫВОДЫ

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям.

- Амплитуды осцилляций напряжения на ёмкости падают и процесс приближается к аperiodическому, если момент электрического пробоя сдвигается во времени от фронта к спаду первой полуволны разрядного тока в нагрузке (рис. 2).

- Вне зависимости от момента "условной" коммутации ток и скорость его изменения во время переходного процесса имеют строго колебательный характер, их амплитуды в существенной мере зависят от момента электрического пробоя нагрузки (рис. 3, 4).

- Пробой в начальной фазе разрядного тока приводит к повышению его амплитуды более чем в ~ 10 раз, сдвиг момента пробоя на пол периода повышает амплитуду разрядного тока всего в $\sim 1,2$ раза (рис. 3).

- Максимальная скорость изменения разрядного тока отмечается при пробое нагрузки в его начальной фазе (рост более чем на порядок), при сдвиге момента пробоя на пол периода скорость изменения тока практически одинакова до и после пробоя.

- Поскольку момент электрического пробоя нагрузки есть случайная величина, выбор параметров надёжных электронных коммутаторов должен ориентироваться, как минимум, на 10-кратное увеличение пропускаемых токов и скорости их изменения в форсмажорных режимах работы магнитно-импульсного оборудования.

В заключение приведём полезную для практики, хотя приближённую и весьма завышенную, оценку величины предельного тока с точки зрения допустимости по условиям теплового нагрева электронных коммутаторов в режимах многократного повторения разрядных импульсов.

Речь идёт о действующем значении тока – I_d

$$I_d \approx I_m \cdot \sqrt{t_i \cdot F}, \quad (17)$$

где I_m – максимум, t_i – длительность импульса (временную форму полагаем прямоугольной), F – частота повторения импульсов.

Например, при амплитуде тока – $I_m \approx 50$ кА, длительности импульса – $t_i \approx 0,5$ мс (один период для характерной частоты ~ 2 кГц) и частоте повторения – $F \approx 5$ Гц получаем, что $I_d \approx 0,05 \cdot 50 = 2,5$ кА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Возможности магнитно-импульсных технологий в сбережении энергии и ресурсов. В кн. "Инфиз: очерки истории творчества". – Харьков: Изд. ООО "Энергоклуб Украины", 2005. – С. 314-328.
2. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобиль-

ной промышленности. // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: 2005. – В. 16. – С. 349-353.

3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Изд. второе, переработанное и дополненное под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо, 2003. – 285 с.

4. К.Д.Рогачёв, Современные силовые запираемые тиристоры. <http://www.elimex.com.ua>

5. Атабеков Г.И., Основы теории цепей. – М: Энергия, 1969. – 424с.

6. Дж.Мэтьюз, Р.Уокер, Математические методы физики. – М: Атомиздат, 1972. – 399с.

Поступила 09.07.2010

Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.,

Ерёмина Елена Федоровна, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, кафедра физики
тел. (057) 700-368-53, e-mail: batygin48@mail.ru.

Воробьёв Валерий Валериевич, аспирант,

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ
кафедра "Автомобильная электроника"
тел. (057) 700-38-52, e-mail: kalifus@yandex.ru.

Гнатова Шасьяна Валериевна, инженер СТК и М
ООО "Наладочно-монтажное управление "Электроюжмонтаж"
61035, Харьков, ул. Каштановая 33
тел. (057) 719-39-97, e-mail: shasyana@yandex.ru

Yu.V. Batygin, V.V. Vorobyov, A.V. Gnatov, Sh.V. Gnatova,

E.F. Yeryomina

Transients in a magnetic-pulse installation discharge circuit under voltage breakdown in the load circuit.

Within the article framework, a transient process in a magnetic-pulse complex discharge circuit during a shunt fault on the load leads is analyzed. Analytical relations for analysis of time dependences of voltage on the capacitive energy storage and current in the discharge circuit for various initial phases of the shunt fault event are obtained. Time dependences for voltage, current and current change speed in the discharge circuit are illustrated for specified values of the shunt fault event initial phase.

Keywords – magnetic-pulse installation, transient process, shunt fault.