

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.316.72

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.080>

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

**А.А. Щерба**<sup>\*</sup>, член-корр. НАН Украины, **Н.А. Ломко**<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина  
e-mail: [nlomko@gmail.com](mailto:nlomko@gmail.com)

*Проведено моделювання та дослідження режимів роботи напівпровідникового преобразователя с промежуточным звеном накопления энергии в системе электропитания магнитодинамической установки (МДУ). Детально досліджено процес управляемого периодического пополнения энергией колебательного контура с нагрузкой. Показана эффективность работы полупроводникового преобразователя в качестве регулятора величины и фазы напряжения на электромагните МДУ, что обеспечивает качественное регулирование электромагнитного давления, воздействующего на расплавленный металл в МДУ. Библиограф. 6, рис. 4.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый преобразователь, промежуточное звено накопления энергии, накопительный и компенсирующий конденсатор, магнитодинамическая установка, электромагнитное давление.

**Введение.** Особенностью электротехнологических режимов магнитодинамических установок, к которым относятся магнитодинамические насосы (МДН) и индукционные плавильные печи, является необходимость обеспечения эффективного управления режимами работы их электромагнитных систем: индукторов и электромагнитов. Каждая отдельная конструкция магнитодинамической установки (МДУ) имеет свои особенности и рассчитана на соответствующий электротехнологический процесс. Эффективность работы МДУ зависит не только от способности установки обеспечить необходимый технологический процесс, а и от того, какой способ преобразования электрической энергии применен для обеспечения этого технологического процесса.

В работах [1, 2] отмечалось, что для глубокого и плавного регулирования напряжения на электромагнитных системах МДУ перспективным является использование тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) с фазовым управлением, а в [3] показано, что использование таких ТРН для регулирования электромагнитного давления в МДУ более целесообразно при регулировании напряжения на индукторах. Параметры электроэнергии, которые подведены к электромагнитным системам МДУ, создающим электромагнитное давление, воздействующее на расплавленный металл на отдельных участках каналов и обеспечивающее его движение, должны отвечать определенным требованиям. Поэтому система электропитания индукторов и электромагнитов каждой МДУ имеет свои особенности.

Актуальными являются исследования, направленные на разработку эффективных способов регулирования величины и фазы напряжения на электромагнитных системах МДУ, а, следовательно, регулирования величиной электромагнитной силы, воздействующей на расплавленный металл на отдельных участках каналов МДУ. Одним из перспективных способов управления движением расплавленного металла является питание и управление электромагнитом МДУ от полупроводникового преобразователя напряжения с промежуточным звеном накопления энергии.

**Целью настоящей работы** является численное моделирование и исследование переходных и установившихся процессов в электромагнитных системах МДУ типа МДН при питании и управлении электромагнита МДУ от полупроводникового преобразователя с промежуточным звеном накопления энергии. При этом в работе выполнялось имитационное моделирование в пакете программ Matlab/Simulink.

**Анализ полученных результатов.** Электромагнит МДУ представляет собой низкосинусную активно-индуктивную нагрузку ( $R_Э, L_Э$ ) мощностью в десятки и даже в сотни кВА. Для компенсации реактивной мощности параллельно электромагниту подключен компенсирующий конденсатор  $C_К$ , т.е. электромагнит, который образует колебательный контур, настроенный на частоту питающего напряжения. Для регулирования величины и фазы напряжения на нагрузке как промежуточное звено между источником питающего напряжения и нагрузкой используется полупроводниковый преобразователь на основе тиристорного регулятора напряжения [1], где вместо зарядных и разрядных тиристоров в качестве элементов бесконтактной коммутации применяются IGBT-транзисторы, что позволяет расширить регулировочные возможности такого регулятора. Управление работой зарядных и разрядных транзисторов осуществляется отдельными, несвязанными между собой системами управления. Синхронизирующим напряжением для каждой из систем является напряжение питающей сети. Схема преобразователя изображена на рис. 1.

Принцип работы преобразователя заключается в возбуждении незатухающих колебаний в контуре ( $R_Э, L_Э, C_К$ ) путем периодической подачи регулируемых порций энергии от емкостного накопителя, состоящего из двух накопительных конденсаторов  $C_{Н1}$  и  $C_{Н2}$ , каждый из которых накапливает заряд в соответствии с полярностью напряжения, на которое он подключен. Регулированием момента коммутации зарядных транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$  осуществляется регулирование количества энергии, накапливаемой в конденсаторах  $C_{Н1}$  и  $C_{Н2}$  и передаваемой в контур, что обеспечивает регулирование напряжения на нагрузке. Момент коммутации разрядных транзисторов  $VT_3$  и  $VT_4$  определяет фазу колебаний в нагрузке.

Дроссель  $R_1, L_1$  введен в зарядную цепь преобразователя для ограничения зарядного тока и увеличения времени заряда накопительных конденсаторов  $C_{Н1}$  и  $C_{Н2}$ , а также для улучшения гармонического состава тока, потребляемого от источника.

При подаче питающего напряжения в первый период происходит заряд накопительных конденсаторов в соответствии с полярностью приложенного на каждый конденсатор напряжения. Во второй период происходит поочередный разряд накопительных конденсаторов на колебательный контур. Следует отметить, что этот разряд – неполный. Во время разряда одного из накопительных конденсаторов на колебательный контур происходит подзарядка другого накопительного конденсатора противоположным по полярности напряжением от внешнего источника. Необходимо подчеркнуть, что с момента появления напряжения на компенсирующем конденсаторе начинается колебательный процесс в колебательном контуре, характер которого зависит исключительно от параметров  $R_Э, L_Э$  и  $C_К$  контура. При этом обмен энергии в колебательном контуре сопровождается подачей дополнительных порций энергии в контур от накопительных конденсаторов, причем первые пять периодов (пока идет переходный процесс) эти порции не равномерны. Поскольку частота подачи дополнительных порций в контур от каждого из накопительных конденсаторов совпадает с частотой свобод-

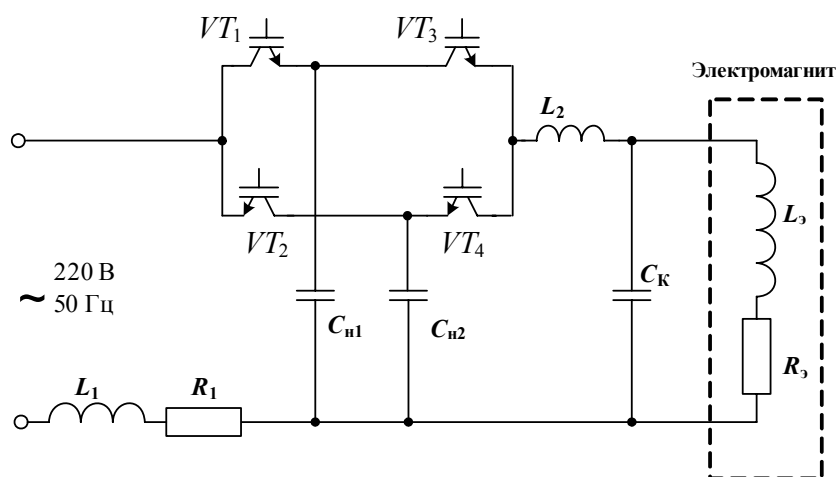


Рис. 1

ных колебаний, то в момент подзарядки компенсирующего конденсатора ток в индуктивной ветви колебательного контура проходит через нуль. Цикл передачи энергии от накопительного конденсатора в контур происходит в течение короткого промежутка времени, составляющего доли процента по отношению к периоду свободных колебаний, т.к. ток в цепи между емкостными элементами ограничивается лишь сопротивлением открытого разрядного транзистора и соединительных проводов, а ток в катушке электромагнита скачком измениться не может. Этот цикл сопровождается перераспределением зарядов между накопительным и компенсирующим конденсаторами. Цикл заканчивается, когда ток между конденсаторами прекращается, и разрядный транзистор отключает цепь. Дроссель  $L_2$  с индуктивностью, на порядок меньшей индуктивности нагрузки, включен в разрядную цепь для ограничения сверхтока при разряде емкости на емкость.

Определим коэффициент преобразования энергии и КПД рассматриваемого процесса, используя закон сохранения заряда.

В исходном состоянии заряды на накопительном и компенсирующем конденсаторах можно представить в виде:  $Q_{H1}(0) = C_{H1}U_{H1}(0)$ ;  $Q_K(0) = C_K U_K(0)$ .

После разряда накопительного конденсатора  $C_{H1}$  на колебательный контур заряды на накопительном и компенсирующем конденсаторах принимают вид:  $Q_{H1}(t) = C_{H1}U(t)$ ;  $Q_K(t) = C_K U(t)$ .

Согласно закону сохранения заряда

$$Q_{H1}(0) + Q_K(0) = Q_{H1}(t) + Q_K(t). \quad (1)$$

Начальная энергия накопительного конденсатора  $C_{H1}(C_{H2})$  до его разряда на колебательный контур

$$W_{H1}(0) = \frac{C_{H1}U_{H1}^2(0)}{2}. \quad (2)$$

Начальная энергия компенсирующего конденсатора  $C_K$  до разряда накопительного конденсатора  $C_{H1}(C_{H2})$  на колебательный контур

$$W_K(0) = \frac{C_K U_K^2(0)}{2}. \quad (3)$$

Конечная энергия накопительного конденсатора  $C_{H1}(C_{H2})$  после его разряда на колебательный контур

$$W_{H1}(t) = \frac{C_{H1}U_{H1}^2(t)}{2}. \quad (4)$$

Конечная энергия компенсирующего конденсатора  $C_K$  после разряда накопительного конденсатора  $C_{H1}(C_{H2})$  на колебательный контур

$$W_K(t) = \frac{C_K U_K^2(t)}{2}. \quad (5)$$

При этом доза энергии, отдаваемая накопительным конденсатором  $C_{H1}$  или  $C_{H2}$  в колебательный контур, может быть определена согласно выражению (10) из [4]:

$$\Delta W_{H1} = C_{H1}(U_{H1}^2(t) - U_{H1}^2(0)) / 2. \quad (6)$$

Коэффициент преобразования энергии рассматриваемого процесса

$$K = \frac{W_{H1}(t) + W_K(t)}{W_{H1}(0) + W_K(0)}. \quad (7)$$

КПД рассматриваемого процесса

$$\eta = \frac{W_K(t) - W_K(0)}{W_{H1}(0) - W_{H1}(t)} = \frac{C_K(U_K^2(t) - U_K^2(0))}{C_{H1}(U_{H1}^2(0) - U_{H1}^2(t))} \quad (8)$$

не зависит от величины активного сопротивления [5] открытого разрядного транзистора и соединительных проводов, а зависит исключительно от величин емкостей накопительного и компенсирующего конденсаторов и от напряжений, на которые они заряжены в соответствующие моменты времени.

Энергия из накопительного конденсатора переходит в контур, сосредоточиваясь в поле компенсирующего конденсатора. Далее энергия заряженного компенсирующего конденсатора переходит в магнитное поле катушки электромагнита, т.е. идет свободный колебательный процесс. Форма кривой напряжения на нагрузке определяется свободным колебательным процессом в промежутках между циклами передачи энергии от внешнего источника. Эти циклы можно рассматривать как результат действия на параллельный колебательный контур источника периодического импульсного двухполярного напряжения с нелинейным внутренним сопротивлением, величина которого равна нулю в интервале действия импульса и бесконечности в паузах.

Угловая частота собственных колебаний контура [6]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{Э}} C_K} - \frac{r_{\text{Э}}^2}{4L_{\text{Э}}^2}} = \frac{2\pi}{T_0}, \quad (9)$$

где  $T_0$  – период собственных колебаний контура.

Коэффициент затухания

$$b = \frac{r_{\text{Э}}}{2L_{\text{Э}}}. \quad (10)$$

Связь между этими величинами можно представить в виде:  $\sqrt{b^2 + \omega_0^2} = 1/\sqrt{L_{\text{Э}} C_K}$ , либо  $b = \sqrt{b^2 + \omega_0^2} \cos \chi$ ,  $\omega_0 = \sqrt{b^2 + \omega_0^2} \sin \chi$ , где  $\chi$  – угол, на который вектор напряжения конденсатора опережает вектор тока, а вектор ЭДС индуктивности отстает на тот же угол от вектора тока, т.е.

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{\omega_0}{b}. \quad (11)$$

Выражения для аналитического описания процессов в контуре в переходном и установившемся режимах можно представить в виде:

$$u_C = U_{Cm} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \chi); \quad (12)$$

$$i = I_m e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \pi); \quad (13)$$

$$u_L = U_{Lm} e^{-bt} \sin(\omega_0 t - \chi), \quad (14)$$

где  $U_{Cm} = U_{Lm} = U_0 / \omega_0 \sqrt{L_{\text{Э}} C_K} = U_0 \sin \chi$ ;  $I_m = U_0 / \omega_0 L_{\text{Э}}$ ,  $U_0$  – начальное значение напряжения на конденсаторе контура после его подзарядки.

Затухающие колебания характеризуются тем, что отношение амплитуды напряжения на конденсаторе в какой-либо момент к амплитуде напряжения через период есть величина постоянная:

$$\frac{u_C(t)}{u_C(t+T_0)} = \frac{U_{Cm} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \chi)}{U_{Cm} e^{-b(t+T_0)} \sin[\omega_0(t+T_0) + \chi]} = e^{bT_0} = e^{\frac{b}{f_0}}. \quad (15)$$

В таком же соотношении находятся и амплитуды тока, взятые через один период.

Затухание колебаний происходит из-за того, что энергия, сосредоточенная в колебательном контуре, постепенно уменьшается. Вначале она равна  $Cu_0^2/2$ , но по мере уменьшения амплитуд оставшаяся энергия в колебательном контуре с течением времени будет равна  $Cu^2 e^{-2bt}/2$ .

Приведенные формулы позволяют произвести расчет величины дополнительной энергии, которую необходимо передать в контур в каждый период (или полупериод) для обеспечения в нем незатухающих колебаний.

Для исследования процессов в полупроводниковом преобразователе было произведено макетирование и исследование режимов работы с помощью пакета прикладных программ Matlab. На рис. 2 показана Simulink-модель преобразователя.

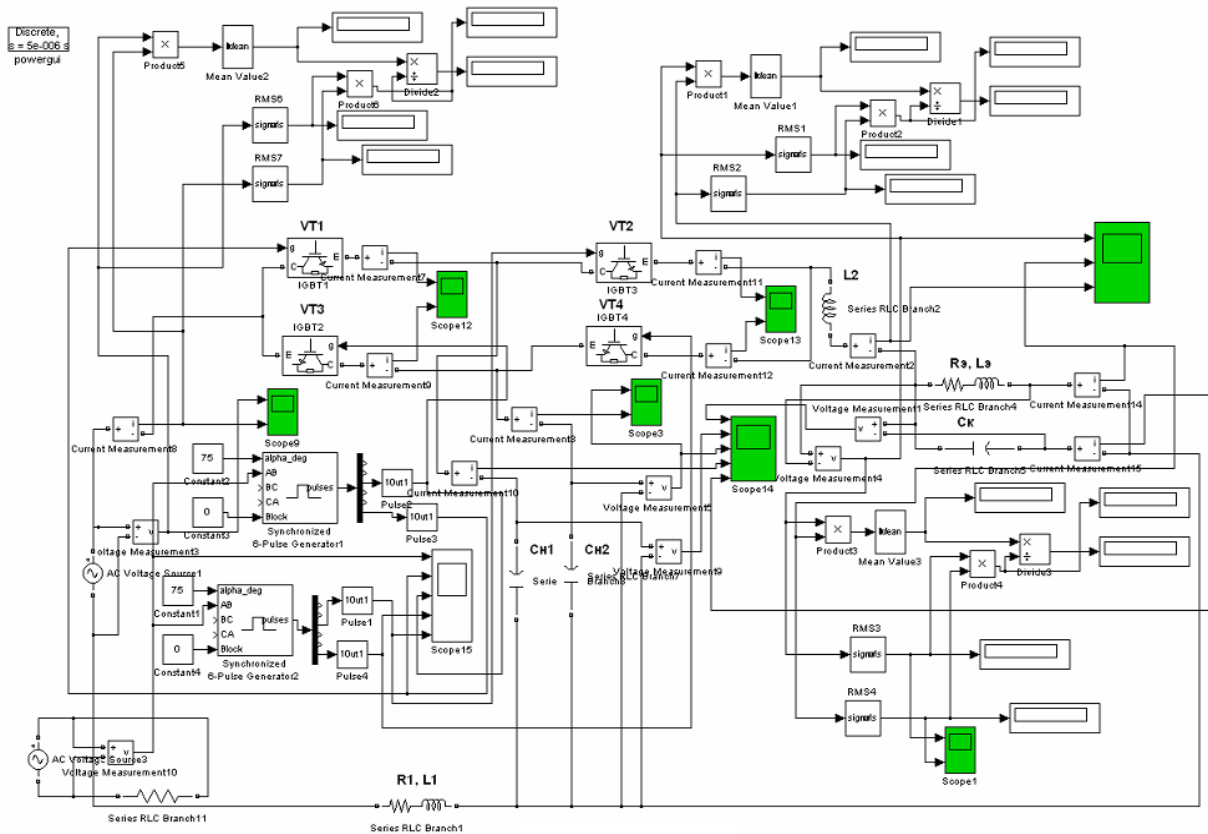


Рис. 2

На моделі електромагніт магнітодинамічної установки МДН-6 представлено активно-індуктивну навантажувачку з параметрами:  $R_3=0,2$  Ом,  $L_3=7$  мГн. Параметри дроселя, обмежувача зарядного струму:  $R_f=0,11$  Ом,  $L_f=2$  мГн. Параметри дроселя в розрядній ланці:  $L_2=0,7$  мГн. Емкість компенсуючого конденсатора:  $C_K=1230$  мкФ. Емкості зарядних конденсаторів:  $C_{H1}=C_{H2}=400$  мкФ. На моделі зарядні транзистори  $VT_1$  і  $VT_2$ , а також розрядні транзистори  $VT_3$  і  $VT_4$  мають відповідні параметри. Керування їх роботою здійснюється окремими, нез'язаними між собою системами управління. Синхронізуючим для кожної з них було напруга джерела живлення. З допомогою приладів, імітують осцилографи і цифрові індикатори, здійснюється контроль входних і вихідних параметрів напруг, струмів, активної потужності, коефіцієнта потужності. Моделювання вироблялося в широкому діапазоні зміни параметрів живлячого напруги і параметрів навантажувачки.

Моделювання дозволяє виробляти корекцію входних параметрів, синхронізацію режимів роботи, цифрову і візуальну обробку отриманих результатів.

На рис. 3 зображено осцилограми напруг на компенсуючому і накопительних конденсаторах, а також осцилограми струмів в одному з накопительних і компенсуючому конденсаторах.

Виробимо перевірку адекватності запропонованої моделі.

На рис. 4 зображено осцилограми, що характеризують процес передачі енергії при розряді накопительного конденсатора (нижня осцилограма) на компенсуючий конденсатор (верхня осцилограма). Згідно рис.4  $U_{H1}(0) = 348,1$  В;  $U_{H1}(t) = 267,3$  В;  $U_K(0) = 283,1$  В;  $U_K(t) = 326,7$  В.

Початкова енергія накопительного конденсатора  $C_{H1}$  до його розряду на коливальний контур згідно (2)

$$W_{H1}(0) = \frac{C_{H1}U_{H1}^2(0)}{2} = \frac{8 \cdot 10^{-4} \cdot 348,1^2}{2} = 48,47 \text{ Дж.}$$

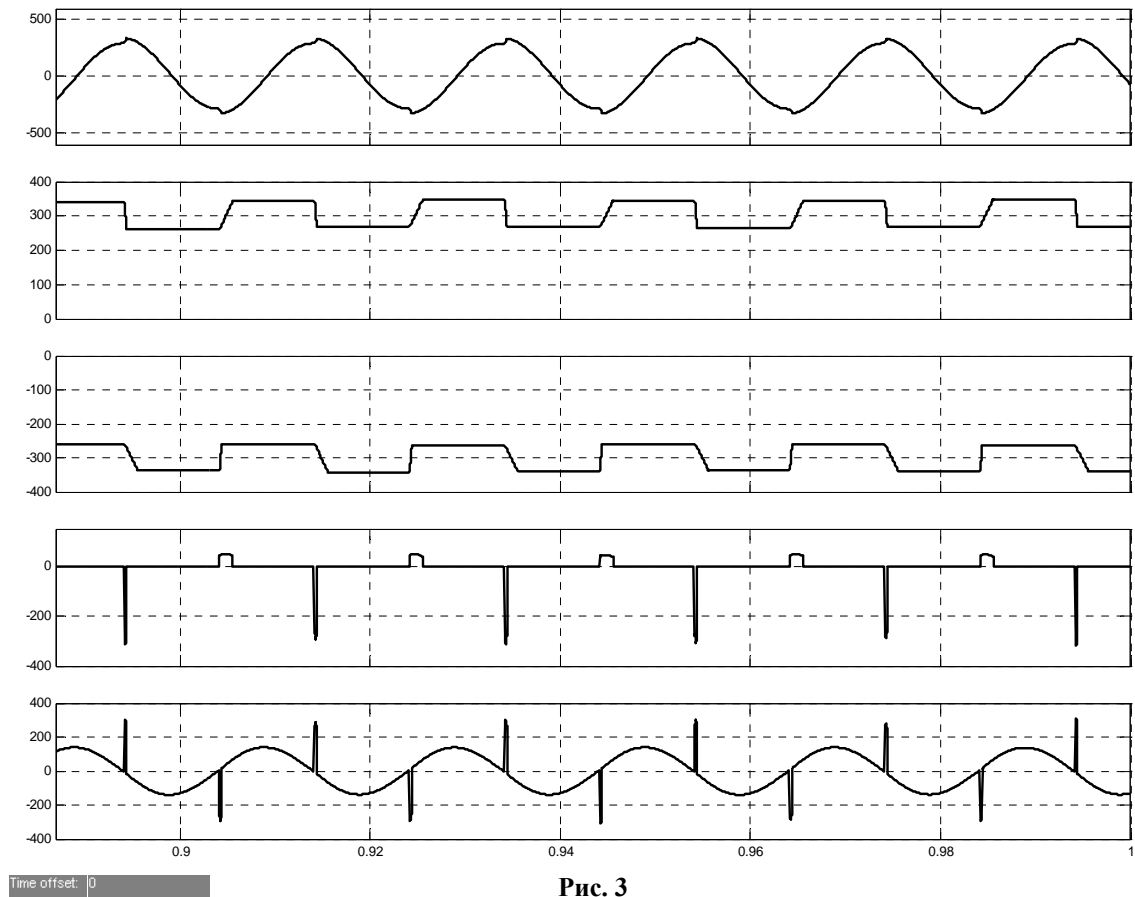


Рис. 3

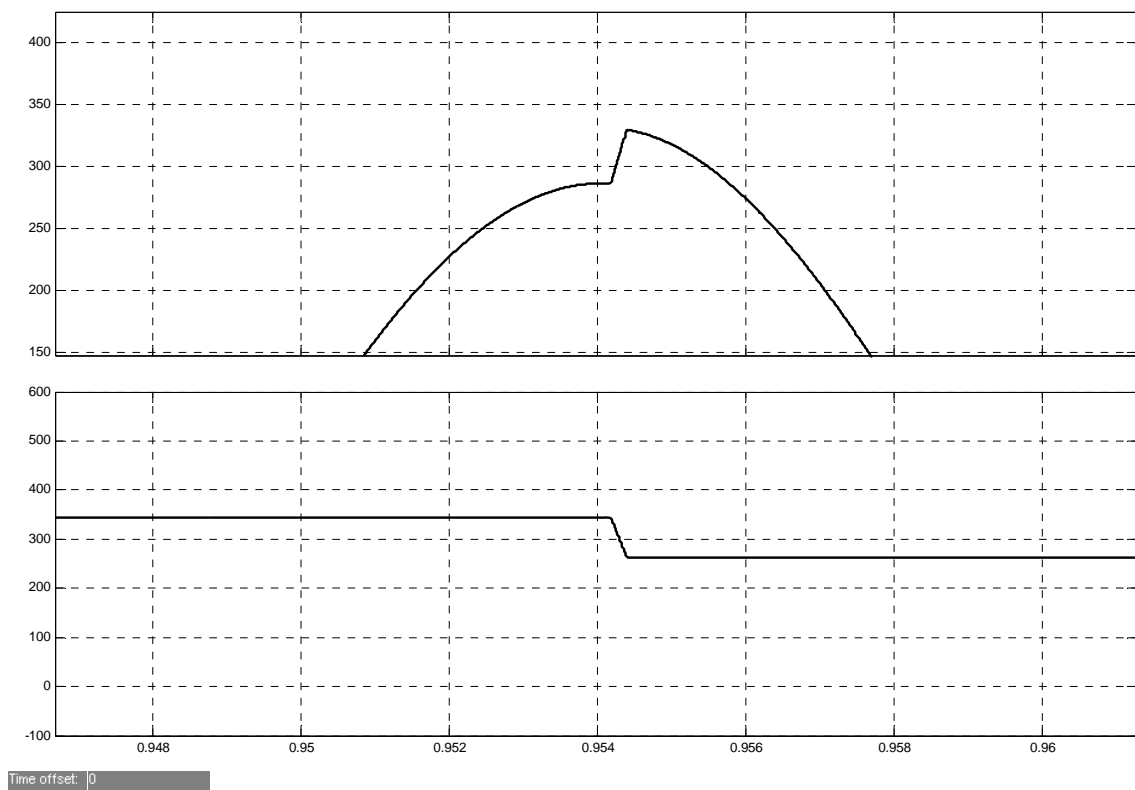


Рис. 4

Начальная энергия компенсирующего конденсатора  $C_K$  до разряда накопительного конденсатора  $C_{HI}$  на колебательный контур согласно (3)

$$W_K(0) = \frac{C_K U_K^2(0)}{2} = \frac{1,436 \cdot 10^{-3} \cdot 283,1^2}{2} = 57,54 \text{ Дж.}$$

Конечная энергия накопительного конденсатора  $C_{H1}$  после его разряда на колебательный контур согласно (4)

$$W_{H1}(t) = \frac{C_{H1}U_{H1}^2(t)}{2} = \frac{8 \cdot 10^{-4} \cdot 267,3^2}{2} = 28,58 \text{ Дж.}$$

Конечная энергия компенсирующего конденсатора  $C_K$  после разряда накопительного конденсатора  $C_{H1}$  на колебательный контур согласно (5)

$$W_K(t) = \frac{C_K U_K^2(t)}{2} = \frac{1,436 \cdot 10^{-3} \cdot 326,7^2}{2} = 76,63 \text{ Дж.}$$

Коэффициент преобразования энергии рассматриваемого процесса согласно (7)

$$K = \frac{W_{H1}(t) + W_K(t)}{W_{H1}(0) + W_K(0)} = \frac{28,58 + 76,63}{48,47 + 57,54} = 0,992$$

К.п.д. рассматриваемого процесса согласно (8)

$$\eta = \frac{W_K(t) - W_K(0)}{W_{H1}(0) - W_{H1}(t)} = \frac{76,63 - 57,54}{48,47 - 28,58} = 0,9598$$

Энергия, теряемая в контуре за половину периода ( $T_0/2=0,01$  с), равна энергии разряда компенсирующего конденсатора, т.е.

$$\Delta W = W_K(t) - W_K(0) = 76,63 - 57,54 = 19,09 \text{ Дж.}$$

В соответствии с показаниями приборов (рис. 2) ток в нагрузке  $I_H = 97,64$  А.

Энергия, теряемая в нагрузке,  $W' = I_H^2 R_{\Sigma} T_0/2 = 97,64^2 \cdot 0,2 \cdot 0,01 = 19,067$  Дж, что соответствует энергии разряда компенсирующего конденсатора.

Формула (15) для половины периода будет иметь вид:  $\frac{|u_C(t)|}{|u_C(t + \frac{T_0}{2})|} = e^{-b \frac{T_0}{2}}$ , где

$b = R_{\Sigma}/2L_{\Sigma} = 0,2/2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 14,2857$ , т.е.  $e^{-b \frac{T_0}{2}} = 1,153565$ .  $R_{\Sigma}$  и  $L_{\Sigma}$  – параметры нагрузки.

Соотношение между напряжениями на компенсирующем конденсаторе, которые сняты с осциллограмм рис. 4,  $U_K(t)/U_K(0) = 326,7/283,1 = 1,154$ , что говорит об адекватности модели.

**Выводы.** 1. Разработана компьютерная модель для исследования процессов в полупроводниковом преобразователе с промежуточным звеном накопления энергии, отражающая основные процессы преобразования энергии при ее передаче от источника к нагрузке. Представленная модель дает возможность оптимизировать как параметры разрабатываемого полупроводникового преобразователя, так и режимы работы действующих электромагнитных систем МДУ.

2. Проведено исследование режимов работы полупроводникового преобразователя с промежуточным звеном накопления энергии и показано, что эффективность его работы определяется не только уровнем регулирования величины и фазы напряжения на электромагнитных системах МДУ, а также величиной КПД преобразования энергии.

*Фінансується за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол №11. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007713.*

1. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Ломко Н.А., Шеховцов В.И. Особенности регулирования величины электромагнитной силы в магнитодинамических установках с помощью тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 61–65.
2. Ломко Н.А. Расширение технологических возможностей магнитодинамических установок с помощью тиристорных регуляторов напряжения. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2005. № 3 (9). С. 26–27.

3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Ломко Н.А. Энергоэффективные режимы работы магнетодинамических установок с использованием тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 48. С. 88–93.
4. Щерба А.А., Ломко Н.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в магнетодинамических установках при питании их электромагнитов от тиристорных регуляторов напряжения с накопительными конденсаторами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. № 39. С. 93–99.
5. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.
6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Москва: Энергия, 1975. 752 с.

УДК 621.316.72

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ПРОМІЖНОЮ ЛАНКОЮ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ДжЕРЕЛАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ІНДУКЦІЙНОЇ ТЕРМООБРОБКИ

А.А. Щерба, член-кор. НАН України, М.О. Ломко, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

Проведено моделювання та дослідження режимів роботи напівпровідникового перетворювача з проміжною ланкою накопичення енергії в системі електроживлення магнетодинамічної установки (МДУ). Детально досліджено процес керованого періодичного поповнення енергією коливального контуру з навантаженням. Показано ефективність роботи напівпровідникового перетворювача як регулятора величини і фаз напруги на електромагніті МДУ, що забезпечує якісне регулювання електромагнітним тиском, який діє на розплавлений метал в МДУ. Бібл. 6, рис. 4.

**Ключові слова:** напівпровідниковий перетворювач, проміжна ланка накопичення енергії, накопичувальний і компенсуючий конденсатор, магнетодинамічна установка, електромагнітний тиск.

### STUDY OF MODES OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS WITH INTERMEDIATE LINK FOR ENERGY STORAGE IN ELECTRICAL POWER SUPPLIES OF ELECTROMAGNETIC SYSTEMS FOR INDUCTION THERMAL TREATMENT

A.A. Shcherba, N.A. Lomko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Simulation and study of the operating modes of a semiconductor converter with intermediate link for energy storage in the power supply system of a magnetodynamic installation (MDI) are carried out. The process of controlled periodic replenishment with energy of an oscillatory circuit with a load is studied in detail. The efficiency of the semiconductor converter as a regulator of the magnitude and phase of the voltage on the electromagnet of MDI is shown, which provides high-quality regulation of the electromagnetic pressure acting on the molten metal in the MDI. References 6, figures 4.

**Key words:** semiconductor converter, intermediate link for energy storage, storage and compensating capacitor, magnetodynamic installation, electromagnetic pressure.

1. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Lomko N.A., Shekhovtsov V.I. Features of regulation of the magnitude of the electromagnetic force in magnetodynamic installations using thyristor voltage regulators with phase control. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2005. No 1. Pp. 61–65. (Rus)
2. Lomko N.A. Enhancement of technical capability of magnetodynamic installations using thyristor voltage regulators. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2005. No 3 (9). Pp. 26–27. (Rus)
3. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Lomko N.A. Energy-efficient modes of operation of magnetodynamic installations using thyristor voltage regulators with phase control. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. No 48. Pp. 88–93. (Rus)
4. Shcherba A.A., Lomko N.A., Suprunovska N.I. Energy processes in magnetodynamic installations at powering its electromagnets from thyristor voltage regulators with reservoir capacitors. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. No 39. Pp. 93–99. (Rus)
5. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
6. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Fundamentals of circuit theory. Moskva: Energiia, 1975. 752 p. (Rus)

Надійшла 17.10.2019

Received 17.10.2019