

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПРИ ПИТАНИИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ОТ ТИРИСТОРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С НАКОПИТЕЛЬНЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

**А.А. Щерба**, чл.-корр. НАН Украины, **Н.А. Ломко**, канд. техн. наук, **Н.И. Супруновская**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Исследованы энергетические процессы в электрических цепях электромагнитов магнитодинамических установок при их электропитании от тиристорных регуляторов напряжения с промежуточными накопительными конденсаторами. Получены аналитические соотношения, позволяющие произвести расчет емкости накопительного конденсатора тиристорного регулятора напряжения, а также определить величину КПД импульсной передачи энергии в нагрузочный контур электромагнита магнитодинамической установки. Выполнено компьютерное моделирование режимов работы тиристорного регулятора напряжения с целью их оптимизации и определения допустимого диапазона регулирования. Библ. 7, рис. 5.*

**Ключевые слова:** магнитодинамическая установка, электромагнит, регулятор напряжения, тиристорный коммутатор, конденсатор, индуктивная нагрузка, коэффициент напряжения, КПД.

Большое количество типов и условий применения магнитодинамических установок (МДУ) обусловило соответствующее разнообразие преобразователей напряжения для их электропитания. Из них на практике наибольшее распространение получили трансформаторные, электромагнитные и индуктивно-емкостные преобразователи, изменяющие величину и фазу питающего напряжения за счет различных способов соединения обмоток трансформаторов, автотрансформаторов, дросселей-делителей и батарей конденсаторов [1]. При необходимости глубокого и плавного регулирования напряжения на электромагнитных системах МДУ достаточно эффективным является применение тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) с накопительными конденсаторами. Схемы таких регуляторов являются полупроводниковыми преобразователями на основе резонансных инверторов с неявно выраженным звеном постоянного тока [1, 3].

В некоторых случаях, в частности в установках малой и средней мощностей (от единиц до нескольких сотен киловатт), применение схем полупроводниковых преобразователей с неявно выраженным звеном постоянного тока позволяет создавать более простые, экономичные и высоконадежные регуляторы напряжения, превосходящие преобразователи на основе традиционных структур [3]. На ранних этапах создания полупроводниковых преобразователей частоты с неявно выраженным звеном постоянного тока указывалось, что они имели ряд недостатков, связанных с отрицательным влиянием на питающую сеть, низким коэффициентом мощности (при малом числе фаз), а также сложностью стабилизации режимов работы элементов и регулирования выходных электрических параметров [3, 6, 7].

В настоящее время разработан ряд новых схем таких полупроводниковых преобразователей с резонансной коммутацией и эффективными способами регулирования силовых и электротермических режимов обработки металлических расплавов, что создает перспективу их применения в современных электротехнологических установках. Применение в таких полупроводниковых преобразователях промежуточных накопительных конденсаторов позволяет реализовать дозированную передачу электрической энергии в технологическую нагрузку, повысить устойчивость магнитодинамических установок к динамическим режимам, а также осуществлять плавное силовое воздействие на расплавленный металл на отдельных участках канала МДУ. В то же время особенности изменения энергетических процессов в цепях электромагнитов таких установок изучены недостаточно, что ограничивает оптимизацию режимов силовой и термической обработки расплавов.

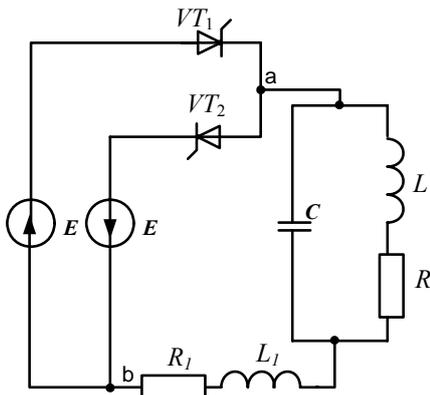


Рис. 1

Поэтому *целью этой работы* было проведение анализа энергетических процессов в магнитодинамических установках при питании их электромагнитов от тиристорных регуляторов напряжения с накопительными конденсаторами и определение целесообразных условий применения таких регуляторов.

Для установок с автоматизированным разливом жидкого металла обычно применяют схему регулятора напряжения со встречно-параллельным включением тиристорных коммутаторов  $VT_1$  и  $VT_2$  в электрической цепи активно-индуктивной  $RL$  нагрузки (электромагнита МДУ), параллельно которой подключена конденсаторная батарея емкостью  $C$  (см. рис. 1) [2, 5]. Величина емкости  $C$  выбирается такой, чтобы разряд конденсатора на нагрузку имел колебательный характер. Сопротивление  $R_1$  в схеме является сопротивлением соединительных проводов, а  $L_1$  – индуктивностью дросселя, который вводится в схему для ограничения скорости нарастания зарядных токов в конденсаторе  $C$  после включения тиристора  $VT_1$  или  $VT_2$ .

Согласованное поочередное включение тиристоров  $VT_1$  и  $VT_2$  позволяет регулировать величину напряжения заряда конденсатора  $C$ , величину токов его колебательного разряда на нагрузку и соответственно силовое воздействие электромагнитного поля на жидкий металл.

Электромагнитные процессы в цепях этой схемы моделировались с использованием пакета прикладных программ MATLAB/SIMULINK. Параметры элементов схемы были выбраны следующими:  $C = 1230$  мкФ,  $R = 0,4$  Ом,  $L = 7$  мГн,  $L_1 = 0,7$  мГн,  $E = 300$  В.

На рис. 2 показаны полученные осциллограммы напряжения на конденсаторе  $U_C(t)$ , напряжения  $U_{ab}(t)$  (разности потенциалов между узлами  $a$  и  $b$ ), токов  $I_C(t)$  и  $I_H(t)$  (протекающих соответственно через конденсатор  $C$  и  $RL$  нагрузку). Из этого рисунка видно, что при выбранных параметрах элементов схемы в течение времени  $\Delta t \approx 1,2$  мс переходные процессы нарастания указанных напряжений и токов практически завершаются и на выходе ТРН возникает установившийся режим. При этом амплитуда напряжения  $U_C$  может в десятки раз превышать напряжение питающего источника (на приведенной осциллограмме превышение составляет более чем в 20 раз).

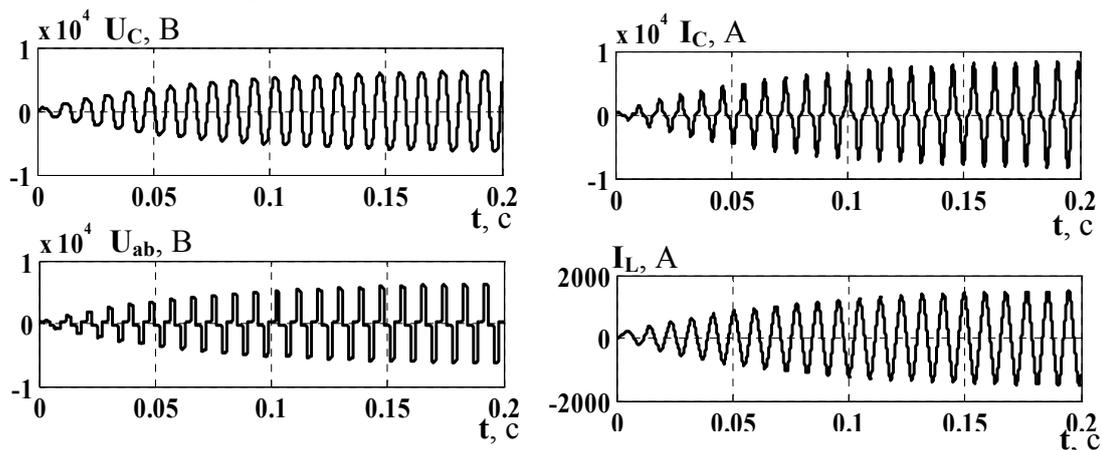


Рис. 2

Многokратное повышение напряжения на конденсаторе возникает в результате его подключения к внешнему источнику напряжения в моменты времени, когда напряжение источника и напряжение на конденсаторе складываются. Если при подключении конденсатора к внешнему источнику питания их напряжения будут вычитаться, то напряжение заряда конденсатора будет уменьшаться. Таким образом, изменяя моменты подключения конденсатора к источнику питания, можно регулировать напряжение его заряда.

После выключения тиристора  $VT_1$  (или  $VT_2$ ) согласно второму закону Кирхгофа для цепи разряда конденсатора  $C$  на  $RL$  нагрузку можно записать уравнение

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i dt = 0, \quad (1)$$

где  $t_1$  – момент выключения тиристора  $VT_1$  ( $VT_2$ ), а  $t_2$  – момент включения тиристора  $VT_2$  ( $VT_1$ ).

При выборе величины емкости конденсатора такой, чтобы соблюдалось неравенство  $C < 4L/R^2$ , в контуре  $C$ - $L$ - $R$  будет возникать затухающий колебательный процесс, причем в течение каждого полупериода свободных колебаний мгновенное значение напряжения на конденсаторе будет изменяться согласно выражению [2, 4–7]

$$u = Ue^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (2)$$

где  $U = E/\omega_0 \sqrt{LC}$ ,  $\psi = \arctg(\omega_0/\delta)$ ,  $\delta = R/2L$  – коэффициент затухания,  $\omega_0 = \sqrt{1/LC - \delta^2}$  – собственная угловая частота колебательного процесса.

Параметры схемы выбираются таким образом, чтобы время заряда конденсатора от внешних источников было гораздо меньше времени его разряда на нагрузку и можно было сделать допущение, что разряд конденсатора начинается практически одновременно с подключением внешнего источника. Затем в соответствии с уравнением (2) в момент  $t \approx 0$  (при подключении внешнего источника) напряжение на конденсаторе в момент начала его разряда на нагрузку равно

$$u_{c(0)} \approx U \sin \psi. \quad (3)$$

Тогда через полпериода свободных колебаний напряжения на конденсаторе (то есть через время  $t = T/2$ ) включается тиристор  $VT_2$ , и к узлам  $a$  и  $b$  (и соответственно к конденсатору  $C$ ) прикладывается напряжение обратной полярности. При этом выражение для напряжения на конденсаторе в этот момент имеет вид

$$u_{c(T/2)} = Ue^{-\frac{\pi}{2\tau g \varphi_L}} \sin\left(\pi \frac{\omega_0}{\omega} + \psi\right), \quad (4)$$

где  $\omega$  – частота следования импульсов внешнего источника;  $\varphi_L = \arctg(\omega L/R)$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в нагрузке на частоте  $\omega$ .

Отношение этих напряжений зависит от параметров элементов контура и характеризует степень понижения напряжения конденсатора (и соответственно передачу им энергии в нагрузку) за время между его подзарядками от внешнего источника электропитания. Назовем абсолютную величину такого отношения коэффициентом понижения напряжения и обозначим его  $K_{\text{ПН}}$ :

$$K_{\text{ПН}} = \left| \frac{u_{c(0)}}{u_{c(T/2)}} \right| = \left| e^{\frac{\pi}{2\tau g \varphi_L}} \frac{\sin \psi}{\sin\left(\pi \frac{\omega_0}{\omega} + \psi\right)} \right|. \quad (5)$$

С помощью введенного таким образом коэффициента  $K_{\text{ПН}}$  на практике принято оценивать степень затухания свободных колебаний в контуре, обусловленную активными потерями энергии конденсатора в нагрузке при его разряде, и степень рассогласования частоты этих колебаний с частотой подключения внешнего источника.

На рис. 3 представлена схема разработанного в Институте электродинамики НАН Украины полупроводникового (тиристорного) регулятора напряжения для питания электромагнитов установок магнитодинамической обработки жидких расплавов. Такой тиристорный регулятор напряжения запитывается от однофазной промышленной сети синусоидального напряжения 220 В частотой 50 Гц.

Принцип его работы заключается в возбуждении незатухающих колебаний в контуре, состоящем из активно-индуктивной нагрузки  $R_3L_3$  (электромагнита МДУ) и параллельно подключенного к ней конденсатора  $C_k$ , путем подачи в контур регулируемых порций энергии от емкостных накопителей ( $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$ ). Эти конденсаторы являются промежуточным звеном накопления энергии между источником питающего напряжения и электромагнитом МДУ.

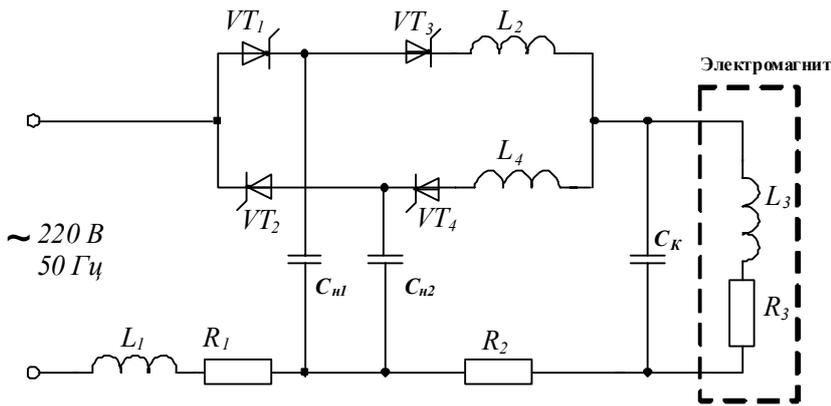


Рис. 3

Заряженные накопительные конденсаторы  $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$  по отношению к контуру выполняют функции импульсного источника электроэнергии.

Величину емкости накопительного конденсатора  $C_{H1}$  и соответственно конденсатора  $C_{H2}$ , а также величину напряжения их заряда  $U_n$  выбираем с учетом необходимого электрического заряда на конденсаторе  $C_k$  и закона сохранения суммарного электрического заряда на конденсаторах  $C_{H1}$  ( $C_{H2}$ ) и  $C_k$  при разряде накопительных конденсаторов.

Допуская, что в процессе перераспределения электрического заряда между конденсаторами  $C_{H1}$  ( $C_{H2}$ ) и  $C_k$ , величины тока и энергии магнитного поля в индуктивности  $L_3$  практически не изменяются, можно записать равенство

$$q_{n(-)} + q_{k(-)} = q_{n(0)} + q_{k(0)}, \quad (6)$$

где  $q_{n(-)}$  и  $q_{k(-)}$  – соответственно заряды накопительного конденсатора  $C_{H1}$  ( $C_{H2}$ ) и конденсатора  $C_k$  контура в момент включения тиристоров  $VT_3$  ( $VT_4$ ), а  $q_{n(0)}$  и  $q_{k(0)}$  – заряды на указанных конденсаторах в момент окончания перезаряда накопительного конденсатора  $C_{H1}$  ( $C_{H2}$ ) на контурный конденсатор  $C_k$ , когда напряжения на них уравниваются.

Учитывая, что  $q_{n(-)} = C_n U_n$ ;  $q_{k(-)} = C_k u_{c(T/2)} = C_k u_{c(0)} / K_{ПН}$ ,  $q_{n(0)} = C_n u_{c(0)}$ ;  $q_{k(0)} = C_k u_{c(0)}$ , после преобразований уравнение (6) можно привести к виду

$$C_n K_{ПН} (U_n - u_{c(0)}) = C_k u_{c(0)} (K_{ПН} - 1) \quad (7)$$

или

$$C_n = C_k \frac{K_{ПН} - 1}{K_{ПН} (K_p - 1)}, \quad (8)$$

где  $K_p = U_n / u_{c(0)}$  – коэффициент разряда накопительного конденсатора, равный отношению напряжений между его обкладками до и после передачи энергии в контур.

В установившемся режиме, который аналогичен представленному осциллограммами на рис. 2, после истечения времени  $\Delta t \geq 1,2$  мс с момента включения ТРН, при неизменных параметрах элементов  $R_3$ ,  $L_3$ ,  $C_k$  и  $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$  величина коэффициента  $K_p$  будет неизменной. Это означает, что после заряда конденсатора  $C_k$  он отдает одинаковую дозу энергии в нагрузку до момента следующего его подзаряда. При подзаряде конденсатора  $C_k$  (рис. 3) доза энергии, которую он получает от конденсаторов  $C_{H1}$  или  $C_{H2}$ , равна

$$\Delta W_k = C_k (u_{c(0)}^2 - u_{c(T/2)}^2) / 2 = C_k u_{c(0)}^2 (K_{ПН}^2 - 1) / 2 K_{ПН}^2. \quad (9)$$

При этом доза энергии, отдаваемая накопительным конденсатором  $C_{H1}$  или  $C_{H2}$  в конденсатор  $C_k$ , может быть определена согласно выражению

$$\Delta W_n = C_n (U_n^2 - u_{c(0)}^2) / 2. \quad (10)$$

Используя формулы (8) и (10), выражение для дозы  $\Delta W_n$  можно записать в виде

$$\Delta W_n = C_k u_{c(0)}^2 (K_p + 1) (K_{ПН} - 1) / 2 K_{ПН}. \quad (11)$$

Из формул (9) и (11) следует, что дозы энергии  $\Delta W_n$  и  $\Delta W_k$  не равны между собой, так как в процессе заряда конденсатора  $C_k$  от конденсатора  $C_{H1}$  или  $C_{H2}$  возникают потери энергии в активном сопротивлении  $R_2$ . Эти потери можно определить из выражения

$$\Delta W_{П} = \Delta W_n - \Delta W_k = \Delta W_k (K_p K_{ПН} - 1) / (K_{ПН} + 1). \quad (12)$$

Частота подзаряда каждого из накопительных конденсаторов  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$  на рис. 3 равна частоте питающей сети ( $f = 50$  Гц). В то же время циклы подзаряда конденсатора  $C_k$  и передача им дозы энергии  $\Delta W_n$  в нагрузку происходят с двойной частотой ( $2f = 100$  Гц). Учитывая это, средняя мощность каждого дозаряда конденсатора  $C_k$  от  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$  может быть определена по формуле

$$P_k = f C_k u_{c(0)}^2 (K_{ПН}^2 - 1) / K_{ПН}^2, \quad (13)$$

а средняя мощность потерь энергии  $P_{П}$  в активном сопротивлении контура подзаряда конденсатора  $C_k$  – из выражения

$$P_{П} = P_k (K_p K_{ПН} - 1) / (K_{ПН} + 1). \quad (14)$$

Допуская, что потерями энергии в сопротивлении  $R_l$  при заряде конденсаторов  $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$  можно пренебречь, для определения коэффициента полезного действия (КПД) ТРН можно применить формулу

$$\eta = \frac{P_k}{P_k + P_{П}} \quad (15)$$

или

$$\eta = \frac{\Delta W_k}{\Delta W_n}. \quad (16)$$

Подставив выражения (13) и (14) в (15) либо (9) и (11) в (16), получим обобщенное выражение для КПД в следующем виде:

$$\eta = (K_{ПН} + 1) / K_{ПН} (K_p + 1). \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что величина КПД импульсной передачи энергии тиристорного регулятора напряжения полностью определяется коэффициентами  $K_{ПН}$  и  $K_p$ .

Работоспособность и энергоэффективность схемы ТРН, приведенной на рис. 3, во многом зависит от выбора параметров его элементов. Определяющими являются соотношения величин емкостей накопительных конденсаторов и конденсатора контура нагрузки, а также соотношение величин индуктивностей и активных сопротивлений в зарядных и разрядных цепях конденсаторов ТРН.

Выбор оптимальных параметров элементов цепей ТРН для реальной активно-индуктивной нагрузки магнитодинамической установки МДН-6, используемой для дозированной разливки алюминиевых сплавов, был выполнен с применением пакета прикладных

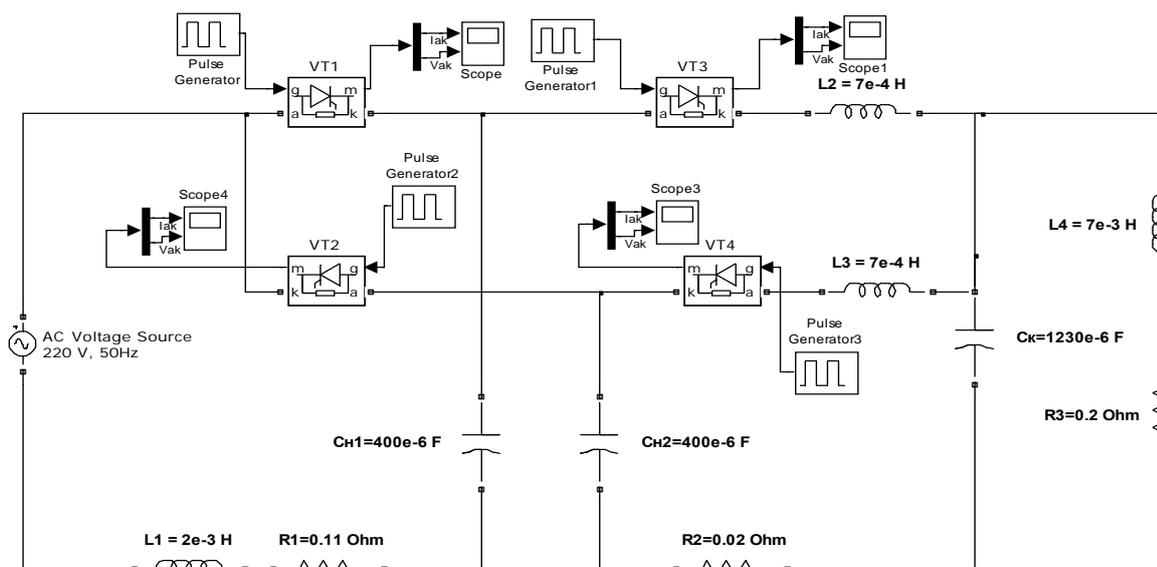


Рис. 4

программ MATLAB/SIMULINK. Электрическая схема для моделирования режимов работы ТРН для регулирования напряжения на электромагните МДН-6 представлена на рис. 4.

В результате проведенных исследований параметры цепей ТРН, работающего от источника синусоидального напряжения  $U=220$  В,  $f=50$  Гц на реальную активно-индуктивную нагрузку, которая представляет собой электромагнит магнитодинамической установки МДН-6 ( $R_3=0,2$  Ом,  $L_4=7$  мГн) с компенсирующей емкостью  $C_K=1230$  мкФ, были выбраны следующими:  $R_1=0,11$  Ом,  $L_1=2$  мГн,  $R_2=0,02$  Ом,  $L_2=L_3=0,7$  мГн,  $C_{H1}=C_{H2}=400$  мкФ.

На рис. 5 показаны полученные в результате моделирования осциллограммы токов и напряжений на элементах цепей (накопительных конденсаторах, конденсаторе контура нагрузки и непосредственно на нагрузке).

Анализ этих осциллограмм показывает, что установившиеся режимы в цепях ТРН могут возникать уже через 0,1 с (т.е. пять периодов питающей сети). При этом напряжение на конденсаторе  $C_K$  может более чем в 2 раза превышать напряжение питающей цепи. Изменением емкостей  $C_K$ ,  $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$  можно в несколько раз изменять напряжение на  $C_K$ , ток в контуре электромагнита и соответственно его силовое воздействие на расплав.

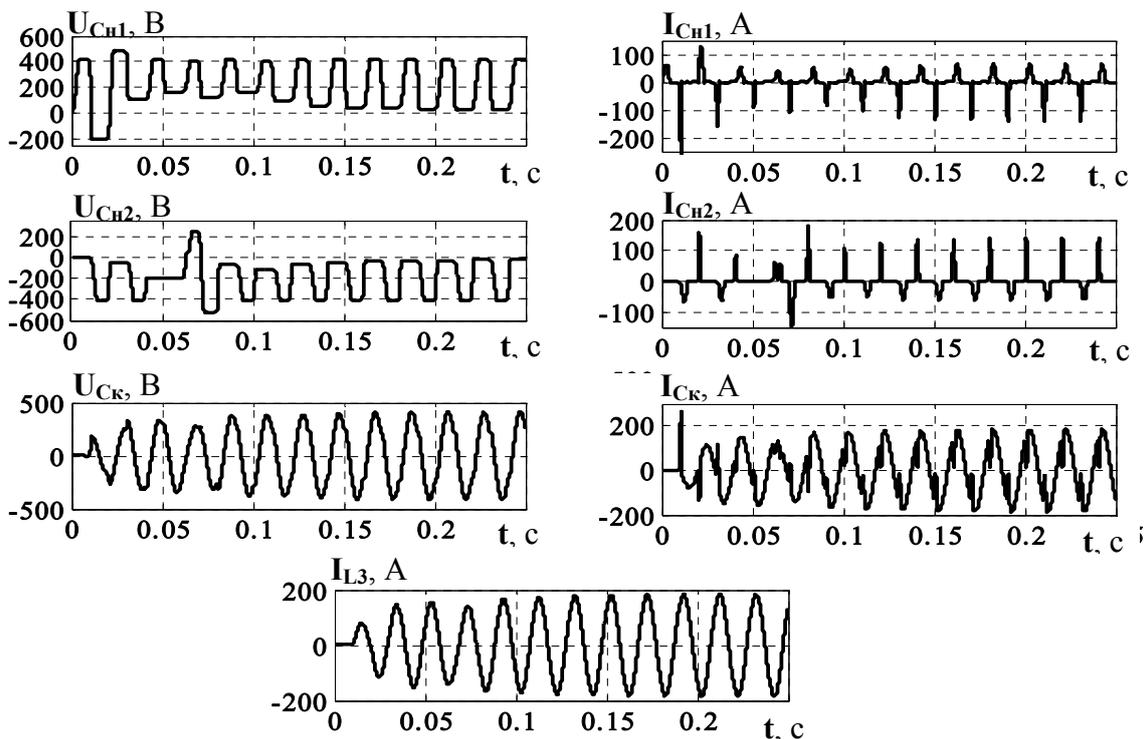


Рис. 5

**Выводы.** 1. Получены аналитические соотношения, позволяющие произвести расчет емкости накопительного конденсатора тиристорного регулятора напряжения, а также определить величину КПД импульсной передачи энергии в нагрузочный контур электромагнита магнитодинамической установки.

2. Показано, что установившихся режимов в цепях ТРН можно достигать уже через 0,1 с (т.е. пять периодов питающей сети), причем напряжение на коммутирующем конденсаторе может в два раза и более превышать напряжение питающей цепи, а изменением параметров ТРН можно в несколько раз изменять силовое воздействие электромагнита на расплав металла.

1. Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Иоффе Ю.С., Матчак А.Т., Моргун В.В. Тиристорные преобразователи высокой частоты. – Л.: Энергия, 1973. – 200 с.
2. Борисов Б.П., Зубюк Ю.П., Шнурко В.К. Системы электропитания магнитодинамических установок. – К.: Наук. думка, 1994. – 248 с.
3. Силкин Е.М. Регулируемые согласованные преобразователи частоты с неявно выраженным звеном постоянного тока и резонансной коммутацией в установках индукционного нагрева малой и средней мощности // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 82–86.
4. Щерба А.А., Поворознюк Н.И. Электротехника. Часть 1. Электричні кола. – К.: Лазурит-Поліграф, 2011. – 384 с.

5. 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 // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 61–65.
6. Kasahara H. Equivalent circuit of high frequency cycloconverter and its application // IEEE Japan. – 1981. – Vol. 101. – No 6. – P. 26.
7. Shinkman A.L., Axelrod B., Chudnovsky V.A. A new simplified model of the dynamics of current-fed parallel resonant cycloconverter // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2000. – No 3. – P. 18.

УДК 621.316.72

**А. А. Щерба**, чл. -кор. НАН України, **М. О. Ломко**, канд. техн. наук, **Н.І.Супруновська**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Енергетичні процеси в магнітодинамічних установках при живленні їхніх електромагнітів від тиристорних регуляторів напруги з накопичувальними конденсаторами**

*Досліджено енергетичні процеси в електричних ланцюгах електромагнітів магнітодинамічних установок при їхньому електроживленні від тиристорних регуляторів напруги з проміжними накопичувальними конденсаторами. Отримано аналітичні співвідношення, що дають змогу зробити розрахунок ємності накопичувального конденсатора тиристорного регулятора напруги, а також визначити величину ККД імпульсної передачі енергії в навантажувальній контур електромагніта магнітодинамічної установки. Виконано комп'ютерне моделювання режимів роботи тиристорного регулятора напруги з метою їхньої оптимізації й визначення припустимого діапазону регулювання. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** магнітодинамічна установка, електромагніт, регулятор напруги, тиристорний комутатор, конденсатор, індуктивне навантаження, коефіцієнт напруги, ККД.

**A.A. Shcherba, M.O. Lomko, N.I. Suprunovska**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Energy processes in a magneto-dynamic installations at powering its electromagnets from thyristor voltage regulator with reservoir capacitors**

*Power processes in electric circuits of electromagnets of magneto-dynamic installations at their power supplies from thyristor voltage regulators with intermediate reservoir capacitors are investigated. The analytic relationship, allowing to calculate the capacity of the reservoir capacitor of thyristor voltage regulator, as well as to define the value of coefficient of efficiency of a pulse transmission of energy in a load contour of an electromagnet of magneto-dynamic installation are found. Computer modeling of operating modes of thyristor voltage regulator for the purpose of their optimization and definition of an admissible range of regulation is executed. References 7, figures 5.*

**Key words:** magneto-dynamic installation, electromagnet, voltage regulator, thyristor commutator, capacitor, inductive load, voltage index, coefficient of efficiency.

Надійшла 14.07.2014  
Received 14.07.2014