

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.316.72

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИРИСТОРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.А. Щерба, чл.-корр. НАН Украины, **А.Д. Подольцев**, докт. техн. наук, **Н.А. Ломко**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
e-mail: nlomko@ied.org.ua

Исследованы режимы работы магнитодинамических установок (МДУ) с использованием тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) с фазовым управлением. Показано, что технологические режимы регулирования электромагнитного давления в МДУ с использованием ТРН позволяют значительно сократить потребление электроэнергии, а также увеличить ресурс работы МДУ. Библиограф. 8, рис. 5.

Ключевые слова: Магнитодинамическая установка, электромагнитное давление, тиристорный регулятор напряжения, энергоэффективность.

Введение. Эффективность работы магнитодинамических установок, к которым относятся магнитодинамические насосы и индукционные плавильные печи, определяется эффективностью управления режимами их электромагнитных систем: индукторов и электромагнитов. Каждая отдельная конструкция МДУ рассчитана на соответствующий электротехнологический процесс. Поэтому система электропитания индукторов и электромагнитов каждой МДУ имеет свои особенности, которые зависят не только от назначения и конструктивных отличий МДУ, а и от того, какой способ преобразования электрической энергии применен для обеспечения необходимого технологического процесса.

Производительность технологического процесса в значительной мере зависит от направления и скорости движения расплавленного металла на отдельных участках каналов МДУ. Поэтому 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.

В работах [2, 8] отмечалось, что для глубокого и плавного регулирования напряжения на электромагнитных системах МДУ перспективным является использование тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением. Несмотря на то, что ТРН обеспечивает наиболее простой способ регулирования напряжения, однако при этом анализ электромагнитных процессов, которые влияют на получение разных технологических эффектов, является довольно сложным, так как продолжительность открытого состояния тиристорного регулятора определяется не только углами их управления, но и режимами нагрузки. Поэтому исследования, направленные на разработку эффективных способов регулирования напряжения на электромагнитных системах МДУ, а следовательно, регулирования величиной электромагнитной силы, воздействующей на расплавленный металл на отдельных участках каналов МДУ, являются актуальными.

Цель настоящей работы – численное моделирование и исследование переходных и установившихся процессов в индукторах и электромагните МДУ типа МДН при питании от тиристорного регулятора напряжения с фазовым управлением и определение энергоэффективных режимов, обеспечивающих необходимую величину электромагнитной силы, которая

воздействует на расплавленный металл. При этом в работе выполнялось имитационное моделирование в пакете программ Matlab/Simulink.

Анализ полученных результатов. На рис. 1 представлена упрощенная схема МДУ [3]. Тигель установки 1 сообщается с III-образным каналом, состоящим из боковых каналов 2,3 и центрального канала 4. Боковые каналы охватываются магнитопроводами индукторов 5 и индуктивно связаны с обмотками электромагнитов 6. Место соединения боковых каналов и центрального (активная зона) находится между полюсами магнитопровода 7 электромагнита с катушкой 8. К центральному каналу присоединен металлопровод для разливки металла.

Из рис. 1 видно, что активная зона расположена перпендикулярно плоскости магнитопровода электромагнита. Поэтому можно считать, что вектор, характеризующий направление тока в активной зоне I_H , и вектор магнитной индукции в межполюсном зазоре электромагнита B перпендикулярны. Тогда электромагнитный напор, как основной показатель энергоэффективности МДУ, может характеризоваться средним за период током, и значение электромагнитной силы dF_{Σ} , действующей на элемент

тока i_H длиной dl , будет определяться выражением для случая синусоидальных токов [1]:

$$dF_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T i_H B dl dt = IB dl \cos(\varphi_{I_H} - \varphi_B), \quad (1)$$

где I и B – действующие значения тока в канале активной зоны и магнитной индукции, соответствующей магнитному потоку, который пронизывает активную зону, а φ_{I_H} и φ_B – начальные фазы этих величин.

Максимальный электромагнитный напор согласно (1) достигается при минимальной разности начальных фаз между током канала и магнитным потоком электромагнита и номинальном (максимальном) напряжении на индукторах и электромагните. Однако в процессе эксплуатации электрические параметры установки изменяются (вымывание футеровки, зарастание каналов и др.). Поэтому необходимо корректировать величины и фазы питающих напряжений. Кроме того, регулирование величины электромагнитного напора необходимо по технологическим соображениям (регулирование интенсивностью перемешивания расплавленного металла при его приготовлении либо дозировании металла в литейные формы машин под давлением).

Из (1) следует, что амплитудно-фазовое изменение напряжения на индукторах существенно влияет на электромагнитный напор в активной зоне установки, где индуцируемый в жидком металле ток взаимодействует с внешним магнитным полем. В то же время при неизменной величине и фазе напряжения на индукторах электромагнитный напор можно регулировать внешним магнитным полем, изменяя величину и направление вектора магнитной индукции B в межполюсном зазоре электромагнита. При использовании ТРН регулировать электромагнитный напор можно только путем его снижения относительно максимального значения, т.е. путем снижения величины и изменения фазы питающего напряжения.

Следует учитывать, что индукторы и электромагнит являются активно-индуктивными нагрузками. Здесь форма кривой тока в цепи не повторяет форму кривой напряжения, т.к. возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая нарастанию и спаданию тока. Поэтому ток через тиристор протекает в течение некоторого времени после изменения знака питающего напряжения. Ток через тиристор протекает в интервале $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \lambda = \alpha_{\text{выкл}}$, где λ – угол проводимости тиристоров.

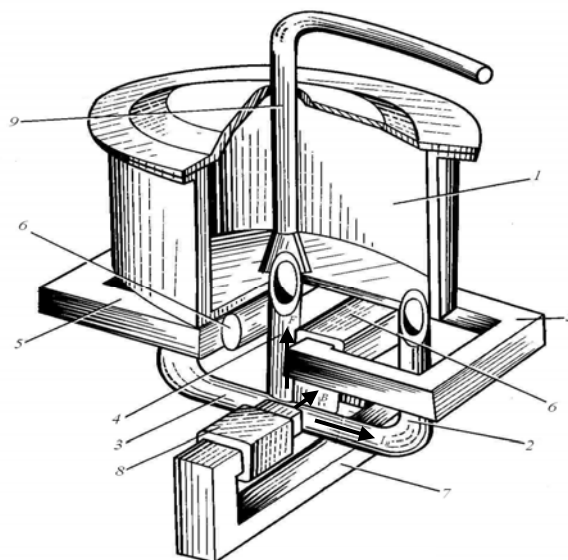


Рис. 1

Действующее значение напряжения на нагрузке при его регулировании с помощью ТРН определяется по формуле, приведенной в работе [6]:

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha_{\text{выкл}}} (\sqrt{2}U)^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}. \quad (2)$$

Ток в нагрузке на интервале проводимости каждого тиристора можно определить, анализируя переходный процесс после отпирания тиристора. Этот ток можно представить в виде суммы свободной и принужденной составляющих.

Принужденная составляющая тока отстает от питающего напряжения $u = \sqrt{2}U \sin \omega t$ на угол $\varphi = \arctg \frac{\omega L_H}{R_H}$ и равна

$$i_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{2}U \sin \omega t}{\sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}}. \quad (3)$$

Свободная составляющая тока изменяется по экспоненте с постоянной времени $\tau = \frac{L_H}{R_H} = \frac{\text{tg} \varphi}{\omega}$ и равна

$$i_{\text{св}} = A e^{\frac{\omega t - \alpha}{\omega \tau}}. \quad (4)$$

При $\omega t = \alpha$ сумма свободной и принужденной составляющих тока равна нулю: $\frac{\sqrt{2}U \sin \omega t}{\sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}} + A = 0$. Коэффициент A равен $A = -\frac{\sqrt{2}U \sin \omega t}{\sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}}$. Ток в нагрузке, учитывая выражения (3) и (4), равен:

$$i_H = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{(\omega t - \alpha)}{\text{tg} \varphi}} \right]. \quad (5)$$

Из уравнения (5) при $i_H = 0$ и $\omega t = \alpha + \lambda$ можно определить угол проводимости тиристор λ : $\sin(\lambda + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\lambda}{\text{tg} \varphi}}$, а также получить графики зависимости угла выключения $\alpha_{\text{выкл}}$ от угла включения α и $\cos \varphi$ при активно-индуктивной нагрузке, представленные на рис. 2.

В работах [2, 8] рассмотрены особенности регулирования величины электромагнитной силы в МДУ с помощью ТРН, в частности при использовании ТРН в цепи электромагнита. Известно [4], что при работе ТРН на активно-индуктивную нагрузку существует область изменения угла отпирания тиристора $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{кр}}$, где $\alpha_{\text{кр}} = \varphi$, в которой изменение этого угла не влияет на величину напряжения на электромагните, а отсюда и на величину тока в цепи электромагнита и электромагнитной силы в активной зоне. Регулирование напряжения и тока активно-индуктивной нагрузки возможно при изменении угла отпирания тиристора в диапазоне $\varphi = \alpha_{\text{кр}} \leq \alpha \leq \pi$. При регулировании к нагрузке прикладывается периодическое несинусоидальное напряжение и через нее протекает прерывистый ток.

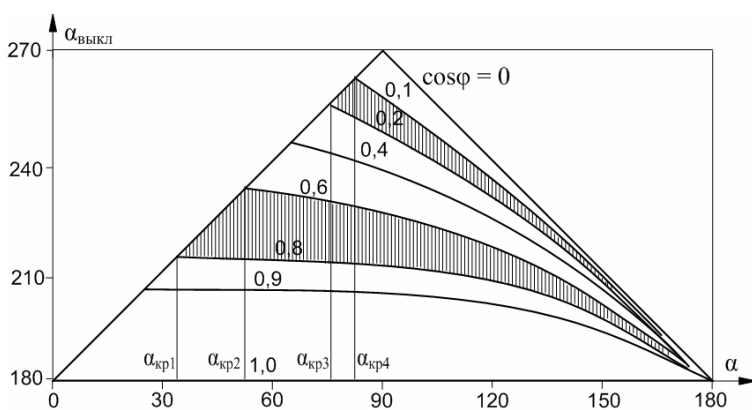


Рис. 2

С помощью пакета прикладных программ для расчета электрических цепей Matlab было произведено макетирование и расчет режи-

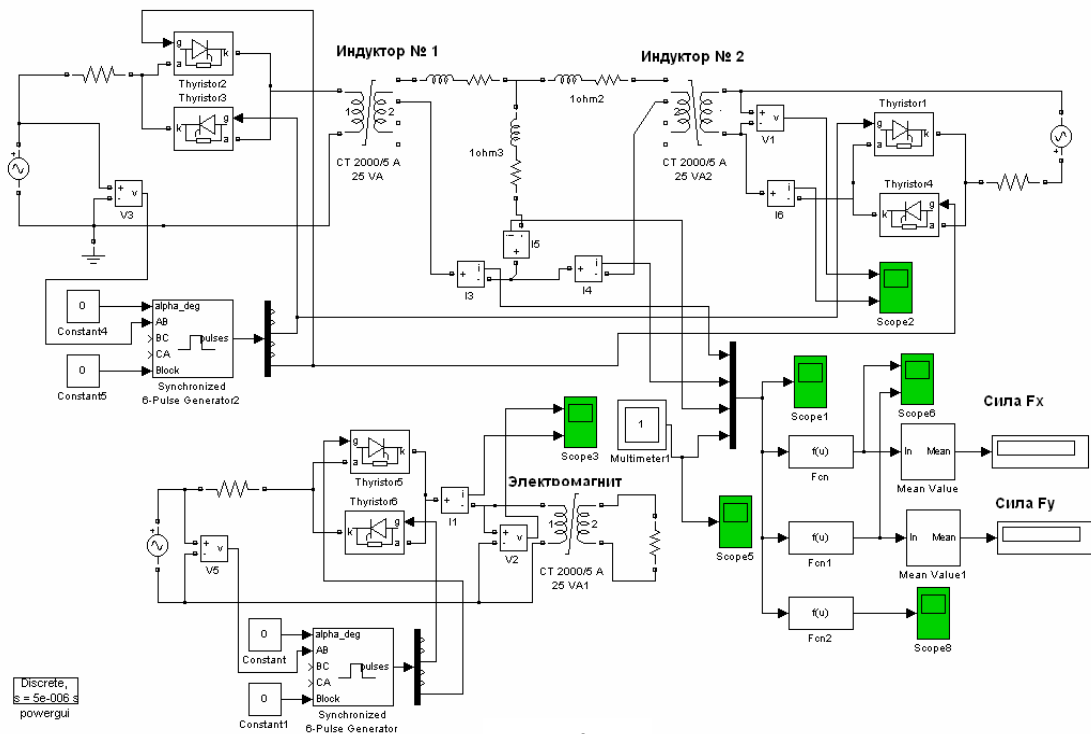


Рис. 3

мов роботи МДУ при регулюванні напруги на індукторах і електромагніті з допомогою ТРН. Simulink-модель МДУ представлена на рис. 3.

Індуктори 1 і 2 представлені в вигляді трансформаторів, вторичними обмотками яких являються короткозамкнуті витки, які мають спільний ділянку. Їх параметри відповідають реальним параметрам витка рідкого металу, а первинні обмотки трансформатора – реальним параметрам обмоток індукторів. Електромагніт представлений трансформатором, що працює в режимі, який близький до холостого ходу. Параметри первинної обмотки відповідають параметрам обмотки електромагніта. В цепі первинних обмоток трансформаторів, які макетують індуктори і електромагніт, включені управляемі тиристри, макетуючі ТРН відповідно: модель ТРН індуктора 1 – тиристри 2, 3; модель ТРН індуктора 2 – тиристри 1, 3; модель ТРН електромагніта – тиристри 5, 6. Для кожної моделі ТРН передбачена можливість регулювання кута управління. Результат взаємодії токів в каналах з магнітним потоком електромагніта в вигляді величини електромагнітної сили виводився на прилади, імітуючі осцилограф і цифровий індикатор. Модель дозволяє оперативно виробляти корекцію входних параметрів, синхронізацію режимів роботи, цифрову і візуальну обробку отриманих результатів.

На рис. 4 представлені залежності, що характеризують зміну величини електромагнітної сили F в активній зоні МДУ від кута включення α при використанні ТРН в цепі індукторів і електромагніта.

Індуктори МДУ, як правило, мають коефіцієнт потужності $\cos \varphi_u \approx 0,6 - 0,8$, що відповідає $\alpha_{кр1,2} \approx 37^\circ - 53^\circ$ (рис. 2), т.е. для $\cos \varphi_u = 0,8$ регулювання напруги на індукторах можна здійснювати, починаючи з кута включення $\alpha_{кр1} = 37^\circ$. Електромагніт має більш виражений індуктивний характер ($\cos \varphi_{эм} \approx 0,1 - 0,2$), тому при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_{эм} = 0,1$ регулювання електромагнітної сили починається з $\alpha_{кр4} = 84^\circ$. Естественно, що регулювальна характеристика індукторів виражена більш плавно, ніж характеристика електромагніта завдяки більшому діапазону кута управління, т.е. використання ТРН для регулювання напруги на індукторах дає можливість значно розширити діапазон зміни величини електромагнітної сили в залежності від кута управління.

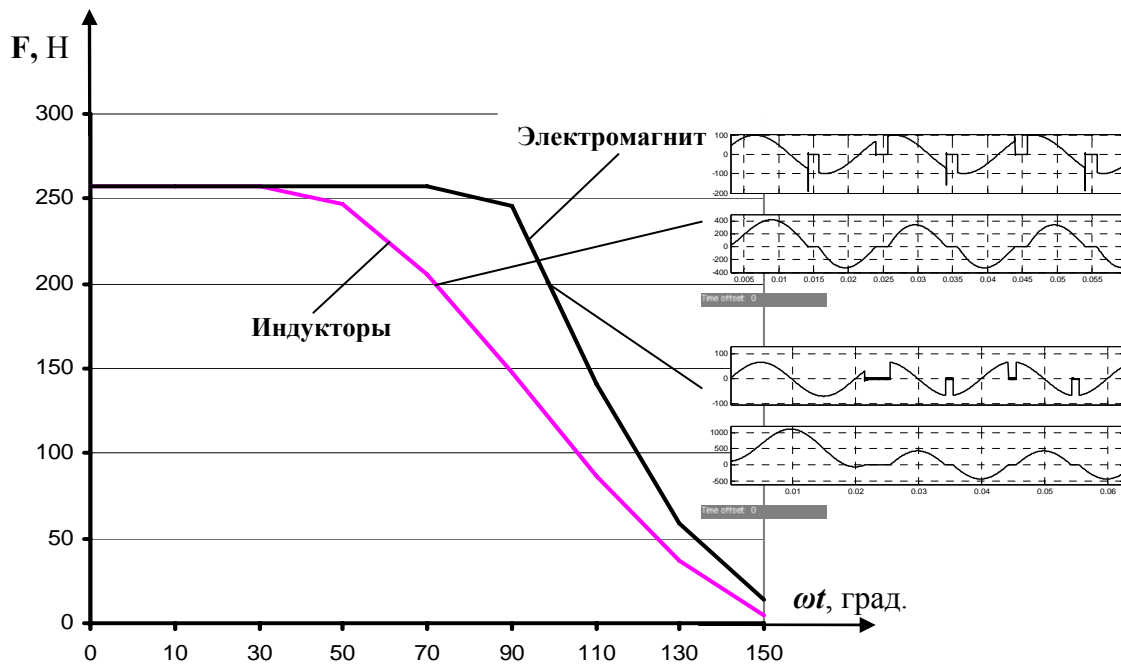


Рис. 4

В конструкциях МДУ изначально предполагалось управление электромагнитной силой путем амплитудно-фазового изменения напряжения на электромагните. При этом использовались различные схемы управления: от трансформаторных и автотрансформаторных до тиристорных с промежуточным накоплением энергии [5, 7] и ТРН с фазовым управлением [2, 8]. И если электромагнит при достаточной компенсации реактивной составляющей не потребляет много энергии благодаря малой активной составляющей, то индукторы являются мощными однофазными несимметричными нагрузками. По технологии индукторы выполняют две функции: разогрев металла до необходимой температуры и совместно с электромагнитом создание необходимой величины электромагнитной силы для создания избыточного давления в активной зоне МДУ. Как правило, это давление создается при достаточной температуре расплавленного металла, и дополнительный нагрев в этот период времени не желателен. Тем не менее при регулировании величины электромагнитной силы с помощью электромагнита индукторы включаются на максимальное напряжение, что приводит к перегреву металла при длительном периоде создания электромагнитной силы (при интенсивном перемешивании и дозированной разливке металла). ТРН в цепи индукторов позволяет плавное амплитудно-фазовое управление напряжением на индукторах при максимальной величине магнитного потока, создаваемого электромагнитом.

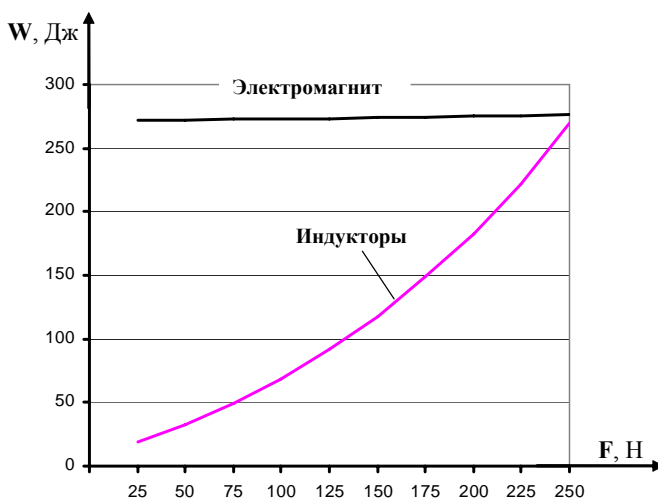


Рис. 5

На рис. 4 показаны осциллограммы напряжения и тока на индукторах при максимальном напряжении на электромагните, а также напряжения и тока на электромагните при максимальном напряжении на индукторах, которые соответствуют электромагнитной силе 200 Н при различных способах регулирования.

На рис. 5 представлены зависимости затрат энергии W на создание необходимой величины электромагнитной силы F при различных способах регулирования электромагнитной силой с помощью ТРН. Из рис. 5 следует, что при уменьшении электромагнитной силы, а следовательно, сни-

жении электромагнитного давления в активной зоне в два раза, затраты энергии при регулировании напряжения на индукторах с помощью ТРН снижаются в три раза по сравнению с аналогичным способом регулирования на электромагните.

Выводы. В магнитодинамических установках использование ТРН для регулирования электромагнитного давления более целесообразно при регулировании напряжения на индукторах, поскольку:

- по сравнению с регулированием напряжения на электромагните более плавный и расширенный диапазон регулирования за счет большего диапазона угла управления;
- при регулировании электромагнитного давления значительно снижаются затраты энергии по сравнению с регулированием напряжения на электромагните;
- снижение напряжения на индукторах при интенсивном перемешивании металла либо его дозировании исключает перегрев металла в активной зоне, что благоприятно сказывается на продлении срока годности футеровки, а значит, способствует увеличению ресурса электрооборудования.

1. Борисов Б.П., Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Шидловский А.К. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии. – К.: Наук. думка, 1990. – 240 с.
2. Ломко Н.А. Расширение технологических возможностей магнитодинамических установок с помощью тиристорных регуляторов напряжения // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – №3(9). – С. 26–27.
3. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К. и др. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. – К.: Наук. думка, 1989. – 256 с.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1978. – 424 с.
5. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
6. Чаки Ф., Герман И., Ипшич И. и др. Силовая электроника: Примеры и расчеты / Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 384 с.
7. Щерба А.А., Ломко Н.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в магнитодинамических установках при питании их электромагнитов от тиристорных регуляторов напряжения с накопительными конденсаторами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – № 39. – С. 93–99.
8. 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.

УДК 621.316.72

А.А. Щерба, чл. -кор. НАН України, **О.Д. Подольцев**, докт. техн. наук, **М.О. Ломко**, канд. техн. наук
Институт электродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Энергоэффективные режимы работы магнитодинамических установок с использованием тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением

Досліджено режими роботи магнітодинамічних установок (МДУ) з використанням тиристорних регуляторів напруги (ТРН) з фазовим управлінням. Показано, що технологічні режими регулювання електромагнітного тиску в МДУ з використанням ТРН дає змогу значно скоротити споживання електроенергії, а також збільшити ресурс роботи МДУ. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: магнітодинамічна установка, електромагнітний тиск, тиристорний регулятор напруги, енерго-ефективність.

A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, M.O. Lomko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Energy efficient modes of magnetodynamic installations using thyristor voltage regulators with phase control

The operation modes of magnetodynamic installations (MDI) using thyristor voltage regulators (TVR) with phase control are investigated. It is shown that the technological modes of electromagnetic pressure control in MDI with the use of TVR allow to reduce significantly power consumption, as well as to increase the MDI operating life. References 8, figures 5.

Key words: magnetodynamic installations, electromagnetic pressure, thyristor voltage regulator, energy efficiency.

Надійшла 12.10.2017
Received 12.10.2017