

The transformer-and-switches executive structure implements the transformation of an AC voltage by changing the voltage transmission coefficients by changing the number of turns of the transformation element. The main criterion of the quality of the transformer-and-switches executive structure is the efficiency of the use of transforming and switch elements. It is shown the expediency of taking into account other criteria of the quality of the device, including the number of simultaneously operating switch elements. This number determines the total energy losses in these elements and the necessary parameters of heatsink for the heat rejection from semiconductor switch elements. References 12, figures 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, AC voltage converter, discrete time, discrete smart transformer, winding section, efficiency of use.

1. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. № 4. P. 11–20.
2. Liu Zhiyong. Voltage deviation adjustor. Patent CN103178527B. 2015.07.01.
3. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-switches executive structures of alternating current voltage converters. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).
4. Willems W., Vandoom T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. "Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe" (ISGT - Europe 2013), IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. P. 1–5.
5. Lypkivskiy K.O., Tonkal V.E., Ozerianskiy A.O. Device for regulation of alternating voltage. Patent USSR No. 413468. 30.01.1974. (Rus)
6. Lypkivskiy K.O. Methods of sectioning of transformer-and-switches executive structures of discrete voltage regulators. Preprint-394. Kyiv. 1984. 16 p. (Rus).
7. Robert C. Degeneff, Friedrich K. Schaeffer; Robert H. Frazer, David A. Torrey, Osman Demirci. Tap changing system having discrete cycle modulation and fault rotation for coupling to an inductive device. US Patent 5604423. Feb. 18. 1997.
8. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Effect of the features of the level control of the stabilized voltage on the power of the transforming element of the AC voltage converter. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2017. No. 3. P. 35–41. (Ukr).
9. Allan David Crane, Warren Mark Blewitt. Power converters. Patent US 2015/0295498A1. Oct. 15, 2015.
10. William O. Kramer, Alireza Daneshpooy. Static voltage regulator and controller. US Patent 6351106B1. Feb. 26, 2002.
11. Robert C. Degeneff, Steven Raedy. Regulator with asymmetrical voltage increase/decrease capability for utility system. US Patent 5990667. Nov. 23, 1999.
12. Lypkivskiy K.O. Topological transformations of transformer-and-switches executive structures of discrete voltage regulators. Preprint-564. Kyiv. 1988. 20 p. (Rus).

Надійшла 27.08.2018

Received 27.08.2018

УДК 621.3:539.3

ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В МНОГОВИТКОВОМ ТОРЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИНДУКТОРЕ

А.П. Ращепкин*, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

e-mail: anatoly_raschepkin@ukr.net

В процессах электро- и магнитоэластической деформаций металлов обоснован метод ослабления импульсных электродинамических сил взаимодействия между обрабатываемым металлом и многовитковым торцевым цилиндрическим индуктором путем использования электропроводного металлического экрана. Полное устранение электродинамических усилий достигается регулированием зазора между индуктором и экраном. Однополярные импульсы тока в индукторе возбуждаются путем разряда электрической емкости на индуктор с использованием управляемого тиристора. Электромагнитные процессы в такой электродинамической системе рассмотрены с использованием известных, разработанных в теоретической электротехнике, методов анализа разрядных процессов конденсатора на активно-индуктивную нагрузку, а также численных методов конечных элементов расчетов. Библ. 7, рис. 6.

Ключевые слова: электроэластическая деформация, электромагнитные параметры индуктора, однополярные импульсы тока, нестационарные разрядные процессы.

Обработка металлов давлением – ковка, штамповка, прокатка, волочение и т.д. – основаны на использовании весьма характерного для металлов свойства пластичности, т.е. способности необратимо деформироваться под действием приложенных напряжений. Если пропускать по деформируемым образцам ток высокой плотности, то прочность металла существенно снижается, что обычно связывают с проявлением электропластического эффекта. Электрический ток вызывает увеличение скорости релаксации напряжений и оказывается удобным технологическим фактором для снятия внутренних напряжений в металле. Сущность электропластического эффекта заключается в увеличении пластичности и уменьшении хрупкости металла под действием импульсов электрического тока. В основе эффекта лежит взаимодействие электронов с дислокациями, которые, перемещаясь, деформируют материал. В результате сопротивление металла деформации сильно уменьшается, увеличивается пластичность и уменьшается хрупкость металла [1].

Помимо воздействия импульсов электрического тока экспериментально установлено также непосредственное влияние постоянных и импульсных магнитных полей на механические характеристики различных ферромагнитных и немагнитных металлов и сплавов, таких как предел текучести, предел прочности, максимальное удлинение, ползучесть, усталостная прочность, а также релаксация напряжений в условиях механического нагружения в присутствии внешнего магнитного поля различной природы и напряженности. Рассмотрены физические механизмы наблюдаемых эффектов, основанные на влиянии магнитного поля на динамику дислокаций [2]. В ферромагнитных материалах для проявления магнитопластического эффекта необходима осцилляция границ магнитных доменов, которая обеспечивает снятие силы торможения движению дислокаций со стороны магнитных доменов благодаря осцилляции тех дислокаций, которые были закреплены на стенках магнитных доменов. Магнитопластический эффект обнаружен также и в неферромагнитных металлах. В частности в меди, например, в присутствии магнитного поля скорость ползучести увеличивается приблизительно в три раза по сравнению с испытанием без поля. Однако предварительное (до приложения нагрузки) приложение магнитного поля не дало заметного эффекта изменения ползучести. Таким образом, магнитопластический эффект проявляется только непосредственно в процессе пластической деформации.

К настоящему времени можно считать надежно установленным существование магнитопластического эффекта при напряженностях магнитного поля до 50...80 кА/м для разнообразных немагнитных и магнитных материалов, но физическая природа магнитопластического, равно как и электропластического эффектов, еще недостаточно изучена. При импульсном воздействии электромагнитного поля на деформируемые металлы, по-видимому, сказывается совместное влияние электрического и магнитного полей.

Включение импульсного тока в процессе активной деформации образцов или ползучести приводит, как правило, к скачкообразному приращению деформации и связанному с этим скачком деформирующего усилия. Зависимость этого эффекта от амплитуды j_0 и длительности t_u импульсов тока носит пороговый характер [3]. Порог по j_0 находится [4] для различных металлов на уровне 250...400 А/мм², а по t_u – на уровне 50...100 мкс.

Целью настоящей работы является разработка бесконтактных, электромагнитных методов возбуждения в металлической среде коротких импульсов магнитного поля и тока большой плотности с компенсацией электродинамических сил на многovitковом индукторе.

Полагая технологический процесс непрерывным с многократным повторением импульсов, для исключения перегрева многovitковая обмотка индуктора выполняется водоохлаждаемой из полого прямоугольного медного провода ДПРХМ 5,0×5,0×1,0 БР М1 с электропроводностью $5 \cdot 10^7$ См/м. В качестве примера расположение плоского цилиндрического индуктора над проводящей полосой с верхним электропроводным экраном, предназначенным для компенсации силового взаимодействия между обрабатываемой полосой и индуктором, показано на рис. 1.

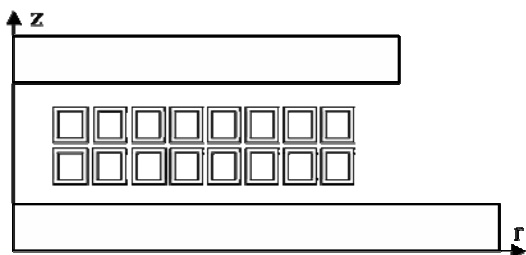


Рис. 1

При определении электромагнитных параметров индуктора в такой системе полагалось, что толщины алюминиевого экрана и обрабатываемой полосы имеющих электропроводность $3,3 \cdot 10^7$ См/м принимают значения $c = (2, 4, 6, 8)$ мм, расстояние между индуктором и пластинами с учетом величины витковой изоляции составляет $d = (1, 2, 4, 6, 8)$ мм. Расстояние между витками и слоями индуктора с учетом величины витковой изоляции составляет

$\Delta i = 1$ мм. Внутренний r_1 и наружный r_2 радиусы индуктора также принимались неизменными и равными соответственно 10 и 58 мм. Число витков $w = 16$ и число слоев индуктора $n = 2$. Сечение провода индуктора равно $16 \cdot 10^{-6}$ м².

Электрические параметры индуктора рис. 1 определялись компьютерным моделированием методом конечных элементов [5] при питании обмотки синусоидальным током заданной амплитуды и различной частоты (от 500 до 10000 Гц). В частности, при $I_e = 11200$ А, $f = 1000$ Гц, $d = 4$ и $c = 8$ мм суммарная амплитудная величина напряжения обмотки составляет $u = 48 + 287i$. Тогда активное сопротивление индуктора равно

$$r = \frac{\operatorname{Re}(u)}{I_e} + \frac{w \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2) / 2}{5 \cdot 10^7 \cdot (5 + 3) \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} kr = 0,0122. \quad (1)$$

Здесь коэффициент дополнительных потерь согласно работе [6] в связи с наличием экрана равен

$$kr = 1 + \frac{h^4}{\delta^4} \left(\frac{w \cdot b}{(b + \Delta i) \cdot w + 4 \cdot r_1} \right)^2 \frac{n^2 - 0,2}{36} = 1,913, \quad (2)$$

где $\delta = 10^3 \sqrt{2 / \mu \sigma 2 \pi f}$; h и b – высота и ширина провода обмотки индуктора.

Индуктивность индуктора равна

$$L = \frac{\operatorname{Im}(u)}{I_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = 4,08 \text{ мкГн}. \quad (3)$$

Таким же образом определяются электрические параметры индуктора при других конструктивных исполнениях, величинах I_e, f, d, c и электрофизических свойствах индукционной системы.

Импульсы электрического тока в индукторе, как и в проводящей полосе, будем получать путем разряда, предварительно заряженного до напряжения U конденсатора емкостью C на электрическую цепь (рис. 2), обладающей найденными выше сопротивлением r и индуктивностью L . Для определения тока в этой цепи будем исходить из основного дифференциального уравнения [7]:

$$L \frac{di}{dt} + r \cdot i + \frac{g}{C} = 0; \quad g = g(0) + \int_0^t i \cdot dt, \quad (4)$$

где g – заряд конденсатора.

Предварительно выполненные согласно приведенным данным расчеты вследствие отсутствия в системе сред с нелинейными электрофизическими свойствами показали, что индуктивность индуктора практически не зависит от величины его тока. Поэтому после дифференцирования (4) по времени приходим к уравнению второго порядка

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0, \quad (5)$$

характеристическое уравнение которого имеет два корня:

$$\gamma_{1,2} = -\frac{r}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha^2 \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}; \quad \alpha = \frac{r}{2L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (6)$$

Следовательно, решение уравнения (5) содержит две постоянных интегрирования, для определения которых необходимы два начальных условия. Первым условием является допущение, что ток в цепи в начальный момент времени равен нулю. В качестве второго условия учтем, что начальное напряжение конденсатора равно $U = g(0)/C$ и согласно уравнению (4) при $t = 0$ должно выполняться условие $di/dt = -U/L$.

С учетом указанных начальных условий разрядный ток в индукторе описывается зависимостью

$$i = -\frac{U}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}}(e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t}). \quad (7)$$

Так как в исходном положении принято, что $f = 1000$ и $\omega_0 = 2\pi f$, то емкость конденсатора должна быть равной $C = 1/\omega_0^2 L = 0,00621$ Ф.

Процесс разряда конденсатора зависит от соотношения между параметрами цепи r, L, C , в итоге определяющими будут ли корни характеристического уравнения вещественными или комплексными, т. е. будет ли разряд апериодическим или затухающим колебательным. В реальных условиях следует в параметрах цепи учесть также влияние сопротивления тиристора и соединительных ветвей, параметры которых зависят от конкретного их исполнения, поэтому здесь в качестве примера ограничимся лишь параметрами индуктора. При комплексных корнях характеристического уравнения ток индуктора принимает вид

$$i = -\frac{U}{\omega l \cdot L} \sin(\omega l \cdot t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \quad (8)$$

где $\alpha = 1498$; $\omega l = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 6102$ – угловая частота собственных затухающих колебаний. Полагая, что в исходном состоянии конденсатор был заряжен до напряжения $U = 850$ В, находим величину импульса плотности тока в витках индуктора

$$j_e = J_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \sin(\omega l \cdot t) \cdot \theta(T_1 - t), \quad (9)$$

в котором путем введения единичной обобщенной функции $\theta(\cdot)$ учтено, что при отсутствии шунтирующего диода тиристор закрывается при переходе тока через нуль, и ток в индукторе изменяется в соответствии с кривой (Т) (рис. 3). Здесь длительность импульса равна $T_1 = \pi/\omega l = 514,5$ мкс и $J_0 = U/(\omega l \cdot L \cdot 16 \cdot 10^{-6}) = 2,135 \cdot 10^9$ А/м². В процессе разряда напряжение конденсатора уменьшается и достигает нуля при

$$T_2 = \frac{\pi/2 + \arctan(\alpha/\omega l)}{\omega l} = 0,000297. \quad (10)$$

При этом диод открывается, что приводит к апериодическому переходному процессу только в цепи индуктора, в результате чего ток в индукторе изменяется согласно кривой (Т+D) (рис. 3) с начальной плотностью тока в индукторе $J_1 = J_0 \cdot e^{-\alpha T_2} \sin(\omega l \cdot T_2) = 9,084 \cdot 10^8$ А/м². В результате изменение во времени плотности тока в индукторе описывается зависимостью

$$j_e = J_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \sin(\omega l \cdot t) \cdot \theta(T_2 - t) + J_1 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot (t - T_2)} \cdot \theta(t - T_2). \quad (11)$$

Изменением емкости конденсатора представляется возможным управлять величиной резонансной частоты f_{LC} -контура и соответственно длительностью импульса. Однако с увеличением резонансной частоты контура для всех размеров принятого конструктивного исполнения индукционной системы уже при частотах, превышающих 5000 Гц, разряд конденсатора переходит в апериодический с существенным уменьшением максимального тока.

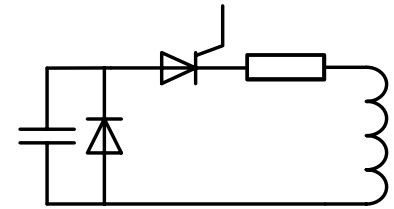


Рис. 2

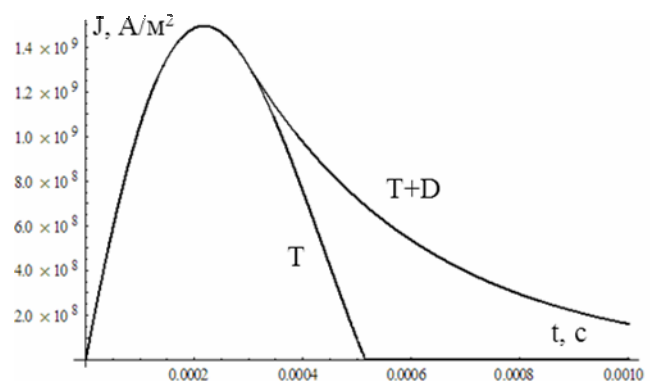


Рис. 3

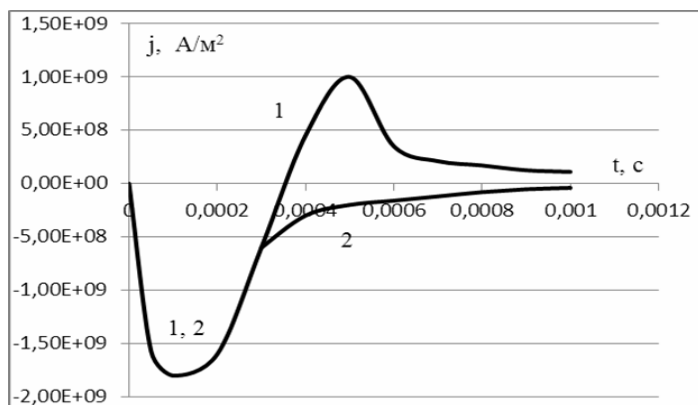


Рис. 4

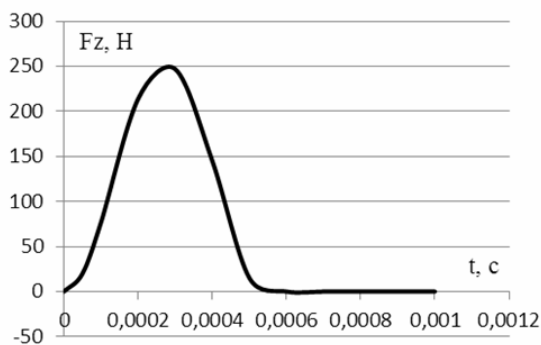


Рис. 5

ряд с однополярным импульсом тока индуктора (рис. 4). К сожалению, даже при аперiodическом разряде конденсатора не представляется возможным возбудить в полосе однополярный импульс тока, который изменяется во времени подобно кривой 1. Амплитуда импульса тока в любом режиме разряда и, следовательно, уровень индуцированной в полосе плотности тока регулируются величиной начального напряжения конденсатора U .

Для обеспечения электропластического эффекта необходимо возбудить в обрабатываемой полосе токи большой плотности, что вызывает для рассматриваемой электромагнитной системы значительные электродинамические силы взаимодействия между индуктором и полосой, достигающие 45 кН. С целью устранения этих сил используется электромагнитный экран, взаимодействие которого с индуктором уравнивает силовое взаимодействие индуктора с обрабатываемой полосой. При этом при прочих равных условиях силовое воздействие на обрабатываемую полосу сохраняет прежнее значение. На рис. 5 показано изменение во времени результирующей z-составляющей силы, действующей на обмотку индуктора. Полное устранение силы достигается регулированием величины зазора между обмоткой индуктора и электромагнитным экраном. Такой же временной зависимостью обладает и радиальная составляющая силы, действующая на обмотку индуктора, но намного большей величины, достигающей в максимуме 42 кН.

Наряду с возбуждением токов большой плотности в полосе наводится магнитное поле

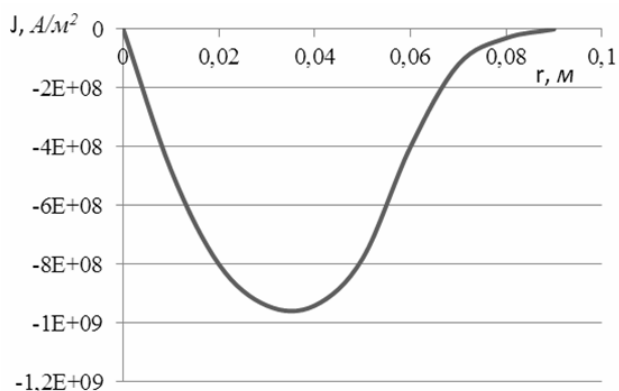


Рис. 6

Впрочем, и при периодическом разряде при постоянном начальном напряжении конденсатора с ростом частоты непрерывно уменьшается амплитуда импульса тока, что не позволяет для принятого исполнения многвиткового индуктора возбудить требуемой величины плотность тока в обрабатываемой полосе с меньшей 130 мкс длительностью импульса тока. Определив временную зависимость тока в обмотке (9, 11), можем изучить нестационарные электромагнитные процессы в индукторе.

На рис. 4 кривой 1 при $r=0,035$ м показано изменение на поверхности обрабатываемой полосы амплитуды плотности тока во времени. Распространяясь вглубь полосы, амплитуда волны отрицательной плотности тока убывает в соответствии с кривой 2. Применение шунтирующего конденсатора диода, приводящего к аперiodическому переходному процессу только в цепи индуктора, не приводит к изменению картины распределения плотности тока в полосе и практически полностью повторяет разряд

с однополярным импульсом тока индуктора (рис. 4). К сожалению, даже при аперiodическом разряде конденсатора не представляется возможным возбудить в полосе однополярный импульс тока, который изменяется во времени подобно кривой 1. Амплитуда импульса тока в любом режиме разряда и, следовательно, уровень индуцированной в полосе плотности тока регулируются величиной начального напряжения конденсатора U .

Для обеспечения электропластического эффекта необходимо возбудить в обрабатываемой полосе токи большой плотности, что вызывает для рассматриваемой электромагнитной системы значительные электродинамические силы взаимодействия между индуктором и полосой, достигающие 45 кН. С целью устранения этих сил используется электромагнитный экран, взаимодействие которого с индуктором уравнивает силовое взаимодействие индуктора с обрабатываемой полосой. При этом при прочих равных условиях силовое воздействие на обрабатываемую полосу сохраняет прежнее значение. На рис. 5 показано изменение во времени результирующей z-составляющей силы, действующей на обмотку индуктора. Полное устранение силы достигается регулированием величины зазора между обмоткой индуктора и электромагнитным экраном. Такой же временной зависимостью обладает и радиальная составляющая силы, действующая на обмотку индуктора, но намного большей величины, достигающей в максимуме 42 кН.

Наряду с возбуждением токов большой плотности в полосе наводится магнитное поле напряженностью по максимуму $3,6 \cdot 10^6$ А/м, распределение которого вдоль радиуса в момент достижения максимальной величины плотности тока совпадает с приведенным на рис. 6 распределением плотности тока вблизи поверхности полосы. Поэтому максимальная величина плотности тока, представленная на рис. 6, за счет быстрого затухания поля по глубине полосы несколько ниже, чем на рис. 4. Наблюдается также неоднородное распределение вдоль радиуса как плотности тока, так и величины напряженности магнитного поля.

Вместе с тем для рассматриваемой электромагнитной системы область превышения требуемой пороговой величины плотности тока выше $2 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ сосредоточена по радиусу в пределах от 0,005 до 0,065 м, а для значений, превышающих $4 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$, сосредоточена по радиусу в пределах от 0,01 до 0,06 м, что можно считать уже вполне допустимым. Если наружную ниже пороговой величины по плотности тока область представляется возможным перекрыть последующим импульсом при сдвиге индуктора на 0,12...0,13 м, то внутреннюю «слепую» зону в области $r=0$ целесообразно было бы свести к минимуму.

Выводы. Применением электромагнитного экрана представляется возможным устранить силовое электромагнитное взаимодействие обрабатываемой полосы и мягкого многовиткового индуктора в процессах электропластической деформации металлов.

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. Москва: МГИУ, 2001. 844 с.
2. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор. *Успехи физики металлов*. 2007. Т. 8. С. 65–105.
3. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилов В.Ф., Гуревич Л.И. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка при действии импульсов тока. *ДАН СССР*. 1978. Т. 239. № 1. С. 84–86.
4. Корж В.Н., Герцрикен Д.С., Лопата Л.А., Хомяковский Ю.Л. Влияние электропластического эффекта на диффузионные процессы в деформируемых металлах. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2010. Вип. 23. С. 326–329.
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
6. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев: Изд. гос. тех. лит. УССР. 1962. 736 с.
7. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, Ч.2. Москва-Ленинград: ГЭИ. 1959. 444 с.

УДК 621.3:539.3

А.П. Ращепкін*, докт. техн. наук

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

ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В БАГАТОВИТКОВОМУ ТОРЦЕВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ІНДУКТОРІ

У процесах електро- та магнітопластичної деформації металів обґрунтовано метод ослаблення імпульсних електродинамічних сил взаємодії між оброблюваним металом і багатовитковим торцевим циліндричним індуктором шляхом застосування електропровідного металевого екрана. Повне усунення електродинамічних зусиль досягається регулюванням зазору між індуктором і екраном. Однополярні імпульси струму в індукторі збуджуються шляхом розряду електричної ємності на індуктор з використанням керованого тиристора. Електромагнітні процеси в такій електродинамічній системі розглянуто з використанням відомих розроблених в теоретичній електротехніці методів аналізу розрядних процесів конденсатора на активно-індуктивне навантаження, а також чисельних методів розрахунку з використанням методу скінченних елементів. Бібл. 7, рис. 6.

Ключові слова: електропластична та магнітопластична деформація, електромагнітні параметри індуктора, однополярні імпульси струму, нестационарні розрядні процеси.

A.P. Rashchepkin

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

PULSED ELECTRODYNAMIC FORCES IN A MULTI-CURRENT FOREVER CYLINDRICAL INDUCTOR

In the processes of electroplastic and magnetoplastic deformations of metals, the method of weakening the impulse electrodynamic forces of interaction between a metal being processed and a multi-turn end cylindrical inductor is substantiated by using an electrically conductive metal screen. Complete elimination of electrodynamic forces is achieved by adjusting the gap between the inductor and the shield. Unipolar current pulses in the inductor are excited by discharging the electrical capacitance to the inductor using a controlled thermistor. Electromagnetic processes in such an electrodynamic system are examined using known methods developed in theoretical electrical engineering for analyzing the discharge processes of capacitance for active-inductive loading, as well as numerical methods for finite element calculations. References 7, figures 6.

Key words: electroplastic deformation, electromagnetic parameters of the inductor, unipolar current pulses, non-stationary discharge processes.

1. Baranov Yu.V., Troitsky O.A., Avraamov Yu. S., Shlyapin A.D. Physical principles of electropulse and electroplastic treatments and new materials. Moscow: MGIU.2001. 844 p. (Rus)

2. Vasiliev M.A Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Successes in the physics of metals*. 2007. V. 8. P. 65–105. (Rus)
3. Zuev L.B., Gromov V.E., Kurilov V.F., Gurevich L.I. Mobility of dislocations in single crystals of zinc under the action of current pulses. DAN SSSR. 1978. Vol. 239. No. 1. P. 84–86. (Rus)
4. Korzh V.N., Gertsriken D.S., Lopata L.A., Khomyakovskiy Yu.L. Effect of the electroplastic effect on diffusion processes in deformable metals. *Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engineering in agricultural production, branch engineering, automation*. 2010. V. 23. P. 326–329. (Rus)
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
6. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. C: Gos. Ed. Those. LIT. USSR. 1962. 736 p. (Rus)
7. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Part 2. M-L: SEI. 1959. 444 p. (Rus)

Надійшла 24.05.2018

Received 24.05.2018

УДК 681.515

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА КООРДИНАТНИХ ЗБУРЕНЬ

М.Я. Островерхов*, докт. техн. наук, М.П. Бурик**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

Запропоновано алгоритми керування електромеханічними системами на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що дає змогу отримати бажану динаміку в умовах параметричних та координатних збурень. Алгоритм керування записується безпосередньо за рівнянням об'єкта керування та диференціальним рівнянням, яким задається бажана якість керування. Реалізація алгоритму показана на прикладі керування електромеханічною системою насосної установки. Дестабілізуючим фактором виступає зменшення на 40 % номінального значення активного електричного опору обмотки ротора асинхронного двигуна та діаметра трубопроводу. При дії збурень якість перехідних процесів не зазнала суттєвої деградації. Бібл. 4, рисунок.

Ключові слова: електромеханічна система, алгоритм керування, мінімізація функціонала.

Вступ. Якісне керування електромеханічними системами пов'язане з компенсацією негативного впливу дестабілізуючих факторів. Визначення параметрів схеми заміщення електродвигунів за паспортними даними здійснюється з похибками, обумовленими допущеннями в методиці обчислень. Внаслідок нагрівання електродвигунів у процесі роботи змінюються електричні опори обмоток [1, 2]. Приведений до валу двигуна момент інерції механізму може змінюватися в результаті зміни кінематики. За своєю природою електродвигуни та механізми є взаємопов'язаними об'єктами керування, коли зміна однієї з координат впливає на інші. Таким чином, керування електромеханічними системами проходить в умовах параметричних та координатних збурень, що обумовлює невизначеність математичної моделі об'єкта керування. Розв'язання цієї задачі класичними методами підвищує громіздкість системи внаслідок використання додаткових алгоритмів ідентифікації та адаптації.

Метою роботи є покращення показників якості відпрацювання електромеханічними системами завдання та компенсування змін навантаження в умовах невизначеності шляхом розробки алгоритмів керування, які забезпечують слабку чутливість до параметричних та координатних збурень.

Концепція керування базується на розв'язанні зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [3]. В основу методу покладена ідея зворотності прямого методу Ляпунова з дослідження стійкості. Це дає змогу знаходити алгоритм керування, при якому замкнений контур регулювання має наперед задану функцію Ляпунова, в якості якої виступає миттєве значення енергії. Отриманий закон надає