

ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ СО СДВОЕННЫМИ ИНДУКЦИОННЫМИ ЕДИНИЦАМИ

А.А. Щерба, чл.-корр. НАН Украины, **Н.А. Ломко**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

Пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследованы процессы в магнитодинамической установке со сдвоенной индукционной единицей и особенности регулирования величины и направления результирующего вектора тока, наводимого индукторами в активной зоне установки при их подключении на напряжения с разными фазами. Получены аналитические соотношения, позволяющие оценить величину электромагнитного воздействия на расплавленный металл в активной зоне при изменении параметров установки в процессе эксплуатации. Библи. 5, рис. 4, таблица.

Ключевые слова: индуктор, электромагнит, активная зона, фазовое управление, результирующий ток, электромагнитный напор.

Введение. В литейном производстве магнитодинамические установки (МДУ) со сдвоенными индукционными единицами (СИЕ) по сравнению с другими типами технологического магнитогидродинамического оборудования имеют ряд преимуществ в организации сквозного течения расплавленного металла через канал при различном включении индукторов [2] и наложении на отдельные участки канала (в активной зоне) внешнего электромагнитного поля. Наличие двух электромагнитных систем (системы индукторов и системы электромагнита) позволяет обеспечивать глубокое управление гидравлическими и тепловыми параметрами расплава и тем самым интенсифицировать процесс его подогрева и перемешивания и соответственно повышать качество металла. Сдвоенные индукционные единицы применяются в магнитодинамических насосах (МДН) для дозирования металлических расплавов и являются основными элементами плавильных установок.

Основными показателями магнитодинамических установок являются электромагнитный напор и скорость подогрева металла, которые обеспечивают максимальную их производительность. Получение необходимых величин этих показателей возможно при значительных мощностях, потребляемых электромагнитными системами МДУ, что вызывает необходимость повышения энергоэффективности таких установок. Следует отметить, что одинаковая величина электромагнитного напора в МДУ может быть достигнута при различных затратах энергии. Поэтому целью данной работы было проведение исследований в направлении определения оптимального способа электропитания МДУ и оптимизации их конструктивного решения.

Обсуждение научных результатов. В статье выполнены исследования режимов в активной зоне СИЕ, в которой создается избыточное электромагнитное давление при взаимодействии токов индукторов с магнитным потоком электромагнита. Величина и направление этого давления зависят от соотношения величин и начальных фаз напряжений на индукторах, а также от величины и фазы напряжения на электромагните.

Полученные аналитические выражения и зависимости позволяют по известным параметрам индукторов определять оптимальные параметры величин и фаз напряжений на индукторах и электромагните для интенсификации тепломассопереноса путем управляемой циркуляции расплавленного металла в каналах МДУ для характерных режимов подогрева и дозированной разливки расплавленного металла. Исследовано также влияние изменения указанных параметров на режимы подогрева и разливки расплавов при эксплуатации МДУ.

В МДУ индукционного типа ток в расплавленный металл индуцируется переменным магнитным полем, создаваемым силовым согласующим трансформатором промышленной частоты. Первичной обмоткой такого трансформатора является индуктор, а вторичной – ко-

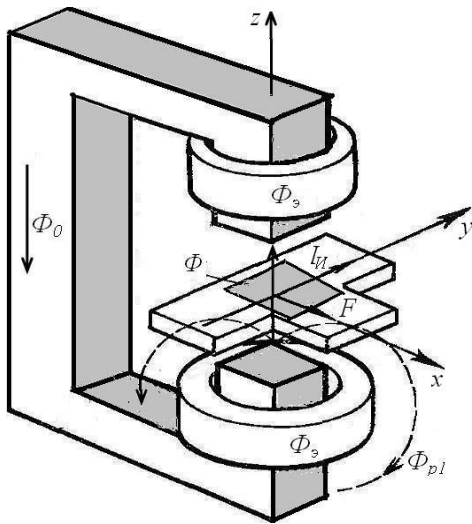


Рис. 1

роткозамкнутый виток расплавленного металла. В конструкции СИЕ имеются два трансформатора – индуктора, вторичные короткозамкнутые витки которых выполнены в виде Ш-образного канала, имеющего общий участок.

Место соединения горизонтальных участков и общего вертикального участка двух короткозамкнутых витков (тройниковая активная зона, показанная на рис. 1) представляет собой жидкометаллический проводник большого сечения.

В результате подвода энергии от двух независимых источников (индукторов), наличия ответвления (центральный канал), а также скин-эффекта токи на различных участках активной зоны имеют различные значения. Исключением можно считать режим параллельного согласного подключения индукторов, когда ток в

центральном канале равен нулю, а ток I_B (кольцевой ток витка), входящий в активную зону, равен току, выходящему из активной зоны. Преобразование энергии электромагнитного поля в механическую энергию тока жидкого металла осуществляется при взаимодействии этого тока с внешним магнитным полем, создаваемым системой электромагнита в активной зоне МДУ.

При подаче переменного напряжения промышленной частоты на электромагнит в его магнитопроводе возникает пульсирующий магнитный поток Φ_{Σ} , основная часть которого замыкается через межполюсный зазор, в котором находится тройниковая активная зона МДН (см. рис. 1), индукция в которой не превышает 0,2...0,3 Тл.

Индукция магнитного потока, создаваемого системой электромагнита, и ток, который наводится в каналах системой индуктора, изменяются по синусоидальному закону, т.е.

$$B = B_m \sin(2\pi ft + \varphi_B); \quad i_{II} = I_{mII} \sin(2\pi ft + \varphi_{iII}).$$

Поскольку активная зона МДН расположена перпендикулярно плоскости магнитопровода электромагнита, то можно считать, что вектор, характеризующий направление тока в активной зоне I_{II} , и вектор магнитной индукции в межполюсном зазоре электромагнита B перпендикулярны (рис. 1). Тогда электромагнитный напор, как основной показатель энергоэффективности МДН, может характеризоваться средним за период током и значение электромагнитной силы dF_{Σ} , действующей на элемент тока i_{II} длиной dl , может определиться выражением [1]

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

где I и B – действующие значения тока в канале активной зоны и магнитной индукции, соответствующей магнитному потоку, пронизывающему активную зону.

МДУ типа МДН, как правило, работают на промышленной частоте, поэтому значение электромагнитной силы dF_{Σ} значительно зависит от углов, от которых зависит направление вектора электромагнитной индукции электромагнита φ_B и вектора результирующего тока в рабочей зоне $\varphi_{I_{II}}$, наводимого индукторами в короткозамкнутом витке. Эти углы зависят от начальных фаз напряжений, которые подведены к электромагнитным системам МДУ, и от параметров этих систем.

Следует отметить, что при неизменной амплитуде напряжений, питающих электромагнитные системы МДУ, и значении $\varphi_{I_{II}}$, изменением величины φ_B можно регулировать величину электромагнитной силы без изменения величины потребляемой электроэнергии. В то же время величина $\varphi_{I_{II}}$, которая характеризует направление результирующего вектора тока в активной зоне, может быть изменена не только путем изменения фазы напряжения на

параллельно-согласно подключенных индукторах, но и путем подключения индукторов на напряжения, отличающиеся по фазе. Такой способ регулирования является наиболее сложным, так как в этом случае одновременно изменяются величина и направление результирующего вектора тока. Однако при таком способе необходимую величину электромагнитной силы можно получить при наименьшем потреблении электроэнергии. Причем при подключении индукторов на напряжения, разные по фазе, электромагнитная совместимость МДУ с питающей сетью повышается.

Начальные фазы тока и магнитного потока в активной зоне МДУ зависят не только от начальных фаз напряжений, питающих индукторы и электромагнит, но и от параметров самих электромагнитных систем МДУ. Эти параметры определяются конструктивными особенностями установок, геометрией канала и магнитопроводов, удельным сопротивлением расплавленного металла и состоянием футеровки, которая в процессе эксплуатации установки пропитывается металлом. Такая футеровка либо размывается (черными металлами), либо зарастает окислами, которые откладываются на стенках каналов установок для расплавов алюминия и его сплавов. Это приводит к изменению размеров каналов и изменению электрического сопротивления индуктора, что необходимо учитывать при разработке общей методики расчета электротехнологических режимов МДУ.

Для определения электромагнитной силы, воздействующей на расплавленный металл в активной зоне во всех режимах подключения индукторов, необходимо в зависимости от фаз подключения этих индукторов определять результирующий вектор тока в активной зоне. В результате подключения индукторов на напряжения, равные по величине, но отличающиеся по фазе, взаимное влияние индукторов друг на друга будет изменяться в зависимости от фазы подведенного к ним напряжения [3,4]. Учитывая все эти особенности, необходимо с достаточной степенью точности определять величину результирующего вектора тока, наводимого индукторами в короткозамкнутом витке расплавленного металла, который, взаимодействуя с магнитным потоком электромагнита, производит силовое воздействие на расплавленный металл в активной зоне.

На рис. 2 представлена полная схема замещения двухиндукторной МДУ.

В этой схеме Ш-образный канал представлен тремя R-ветвями. Их сопротивления зависят от геометрических размеров канала, удельного электрического сопротивления находящегося в нем металла и его температуры. Учтены также потери в обмотках и стали магнитопроводов индукторов и электромагнита, а также взаимное влияние электромагнитных систем.

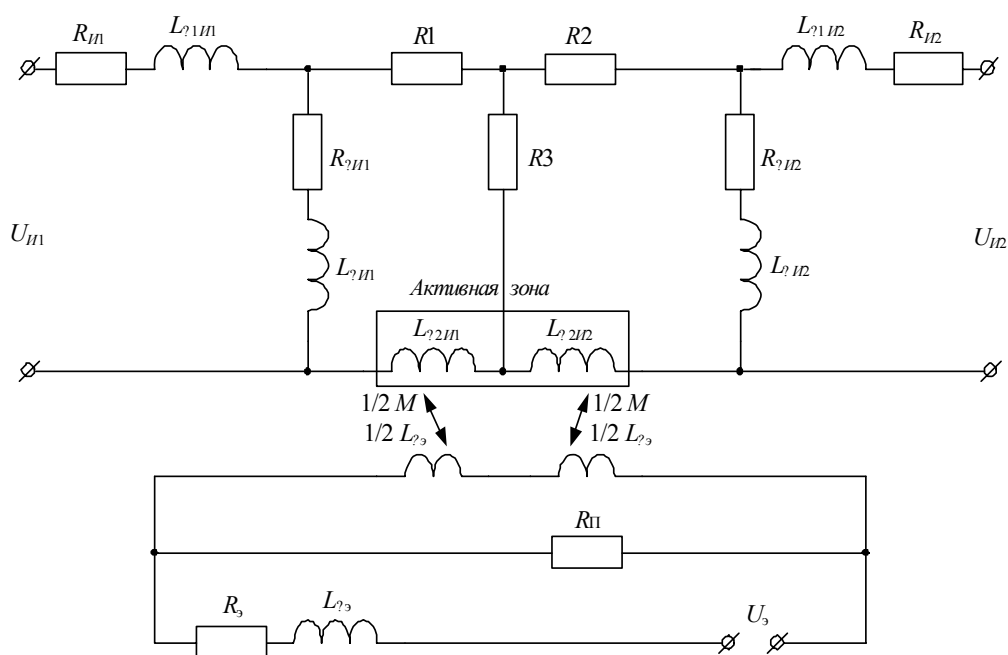


Рис. 2

Следует отметить, что ток холостого хода в установках типа МДН-6 не превышает 3 % от номинального тока индуктора, что позволяет перейти к упрощенной схеме замещения двоякционной единицы МДУ, представленной на рис. 3.

В таком случае выражения для токов ин-

напряжение индуктора 1 опережает по фазе напряжение индуктора 2, то $\Delta\varphi$ имеет положительное значение, и наоборот.

Величина модуля результирующего тока в активной зоне равна

$$|I_p| = nU \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \sqrt{(g_1 + g_{12})^2 + (b_1 + b_{12})^2}, \quad (4)$$

а величина аргумента вектора результирующего тока в активной зоне –

$$\varphi_{I_p} = \text{arctg} \frac{(g_1 + g_{12}) \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + (b_1 + b_{12}) \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}}{(g_1 + g_{12}) \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - (b_1 + b_{12}) \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}}. \quad (5)$$

Здесь g_1, b_1, g_{12}, b_{12} – активные и реактивные составляющие проводимостей \underline{Y}_1 и \underline{Y}_{12} соответственно.

Если известны величина электромагнитной индукции в межполюсном зазоре электромагнита и длина активной зоны dl , то расчетное значение электромагнитной силы можно определить по формуле

$$F = I_p B dl \cos \alpha, \quad (6)$$

где $\alpha = \varphi_{I_p} - \varphi_{I_3}$, φ_{I_3} – фаза тока, совпадающая с фазой магнитного потока электромагнита.

Практическая реализация полученных результатов. Согласно экспериментальным данным параметры индукторов физической модели лабораторной установки МДН-6 при их параллельно-согласном (0°) и параллельно-встречном (180°) подключении и включенном электромагните соответственно равны

$$\underline{Y}_{I1(0^\circ)} = \underline{Y}_{I2(0^\circ)} = 5,7236e^{-j68,93^\circ}; \quad \underline{Y}_{I1(180^\circ)} = \underline{Y}_{I2(180^\circ)} = 3,8398e^{-j64,77^\circ}.$$

В соответствии с выражениями (6) и (7) из [5] определим параметры схемы замещения (рис. 3) \underline{Y}_1 и \underline{Y}_{12} :

$$\underline{Y}_1 = \frac{\underline{Y}_{I1(0^\circ)} + \underline{Y}_{I2(180^\circ)}}{2} = \frac{5,7236e^{-j68,93^\circ} + 3,8398e^{-j64,77^\circ}}{2} = 4,7787e^{-j67,25^\circ} = 1,848 - j4,4069;$$

$$\underline{Y}_{12} = \frac{\underline{Y}_{I1(0^\circ)} - \underline{Y}_{I2(180^\circ)}}{2} = \frac{5,7236e^{-j68,93^\circ} - 3,8398e^{-j64,77^\circ}}{2} = 0,9571e^{-j77,3^\circ} = 0,2104 - j0,9337,$$

откуда $g_1 + g_{12} = 2,0584$ См, $b_1 + b_{12} = -5,3406$ См, $\sqrt{(g_1 + g_{12})^2 + (b_1 + b_{12})^2} = 5,72355$.

Далее, в соответствии с уравнениями (4) и (5) определим модуль и аргумент вектора результирующего тока в активной зоне, а по формуле (6) – расчетное значение электромагнитной силы.

В таблице представлены экспериментальные и расчетные данные для физической модели лабораторной установки МДН-6, работающей в режиме, имитирующем дозирование металла. В экспериментальных данных электромагнитная сила, получаемая в результате взаимодействия результирующего тока индукторов в активной зоне на участке $dl=90$ мм с магнитным потоком, создаваемым электромагнитом, измерялась специальным приспособлением. При расчете электромагнитной силы величина электромагнитной индукции в межполюсном зазоре электромагнита соответствовала экспериментальным данным.

Δφ гр.	Δψ гр.	Эксперимент									Расчет					
		Индуктор 1, $\varphi_{U_{H1}} = 150^0$		Индуктор 2			Электромагнит				F, Н	I_p / n , А	φ_p , гр.	α , гр.	cos α	F, Н
		I, А	φ_r , гр.	$\varphi_{U_{H2}}$, гр.	I, А	φ_r , гр.	φ_{U_3} , гр.	φ_{I3} , гр.	B, Тл							
0	0	296	81,22	150	294	80,92	150	71,78	0,24	186	294,76	81,07	9,29	0,9869	188	
30	30	291	75,47	120	280	55,32	120	45,77	0,2	144	284,72	66,08	20,31	0,9378	144	
60	30	278	72,42	90	289	32,05	120	45,77	0,22	157	261,72	51,08	5,31	0,9957	155	
90	60	250	68,43	60	263	4,87	90	14,58	0,2	101	208,43	36,08	21,5	0,9304	105	
120	60	234	68,4	30	254	-21,17	90	14,58	0,22	88	147,38	21,08	6,5	0,9936	90	
150	60	223	68,92	0	207	-48,85	90	8,87	0,25	54	76,29	6,08	-2,79	0,9988	53	

В таблице $\Delta\psi = \varphi_{U_{H1}} - \varphi_{U_3}$, где $\varphi_{U_{H1}}$ и φ_{U_3} – начальные фазы напряжений первого индуктора и электромагнита.

Сравнение приведенных в таблице экспериментальных и расчетных данных показывает достаточную точность полученных результатов, которая для величины электромагнитной силы не превышает 4 %.

Выводы. 1. С учетом того, что параметры электромагнитных систем МДУ изменяются в процессе эксплуатации, а также изменяются параметры футеровки установки, необходимо осуществлять постоянный контроль ее напорных характеристик. Используя полученные соотношения, можно оценивать текущие параметры установки, тенденцию их изменений в процессе эксплуатации и остаточный эксплуатационный ресурс установки.

Уравнения (4) и (5), связывающие модуль и аргумент результирующего тока, наводимого индукторами в активной зоне, с разностью фазовых соотношений между напряжениями, питающими индукторы, позволяет уточнять общую методику исследования и расчета многоиндукторных амплитудно-фазозависимых установок.

2. Значение угла α влияет на эффективность использования электроэнергии, потребляемой МДН так же, как значение фазового угла между током и напряжением определяет эффективность использования мощности трансформатора, питающего нагрузку с коэффициентом мощности, отличающимся от единицы.

Фазовое управление индукторами при неизменной величине питающего напряжения позволяет расширить регулирующие возможности МДУ и улучшить их электромагнитную совместимость с питающей трехфазной сетью, что в целом обеспечивает снижение потребления электроэнергии.

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. Борисов Б.П., Зубюк Ю.П., Шнурко В.К. Системы электропитания магнитодинамических установок. – К.: Наук. думка, 1994. – 248 с.
3. Щерба А.А., Ломко Н.А. Электромагнитная совместимость двухиндукторных амплитудно-фазозависимых магнитодинамических установок с питающей трехфазной сетью // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2011. – Ч. 2. – С. 56–61.
4. Щерба А.А., Ломко Н.А., Гориславец Ю.М. Энергоэффективные режимы магнитодинамических установок со двояными индукционными единицами // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2009. – Ч. 2. – С. 30–33.
5. Щерба А.А., Шнурко В.К., Ломко Н.А., Зубюк Ю.П. Исследование влияния параметров питающих напряжений на режимные характеристики магнитодинамических установок // Техн. електродинаміка. – 2003. – № 1. – С. 68–71.

УДК 621.316.72

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

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Фазове керування електромагнітними процесами в магнітодинамічних установках зі з двоєними індукційними одиницями

Досліджено процеси в магнітодинамічній установці зі здвоєною індукційною одиницею і особливості регулювання величини і напрямку результуючого вектора струму, що наводиться індукторами в активній зоні установки при їхньому підключенні на напруги з різними фазами. Отримано аналітичні співвідношення, що дають змогу оцінити величину електромагнітної дії на розплавлений метал в активній зоні при зміні параметрів установки в процесі експлуатації. Бібл. 5, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: індуктор, електромагніт, активна зона, фазове керування, результуючий струм, електромагнітний напір.

A.A. Shcherba, N.O. Lomko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Phase control of electromagnetic processes in the magnetodynamic installations with twin induction units

The processes in a magnetodynamic installation with twin induction unit and control features of magnitude and direction of resultant vector of the current induced by inductors in an active zone such installation are studied. The modes of phase control by inductors at invariable magnitude of feeding voltage are analyzed. Such modes allow to expand the controlling capabilities of magnetodynamic installation and to improve its electromagnetic compatibility with a three-phase supply main which provides decrease of electrical energy consumption as a whole. The analytical relationships allowing to evaluate the degree of electromagnetic effect on molten metal in an active zone at change of installation parameters during operation are found. References 5, figures 4, table.

Key words: inductor, electromagnet, active zone, phase control, resultant current, electromagnetic pressure.

Надійшла 18.06.2013

Received 18.06.2013