



УДК 621.365

*А. А. Идиятулин, С. Ф. Саранулов,
Ф. Н. Саранулов, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН ЗА СЧЕТ ВНУТРЕННЕЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Описывается способ внутренней компенсации реактивной мощности. Дается сравнительный анализ с традиционной поперечной компенсацией реактивной мощности. Предлагается использовать данный метод для индукционных машин с увеличенным воздушным зазором.

Магнитогиродинамическая машина, компенсационная обмотка, индукционная тигельная печь, индуктор, электромагнитный вращатель, многофункциональный плавильный агрегат

Индукционные магнитогиродинамические (МГД) машины обладают низким коэффициентом мощности. Это связано со спецификой данного класса электромеханических преобразователей энергии с жидкометаллическим немагнитным вторичным элементом (ВЭ): повышенные немагнитные зазоры, большие полюсные деления и низкая частота питания индуктора. Они представляют собой «низкосинусную» нагрузку и чаще всего нуждаются в компенсации реактивной мощности. Помимо традиционного способа компенсации путем включения параллельно индуктору батареи статических конденсаторов в литературе рассматриваются альтернативные способы так называемой внутренней компенсации [1], когда при числе пазов на полюс и фазу $q > 1$ (рис. 1, а) можно каждую исходную фазу разделить на две новых с половинным значением q (рис. 1, б). При этом одна ветвь исходной фазы A («новая» фаза A_c) остается силовой, а вторая D после смены начала и конца замыкается на емкость C по схеме поворотного трансформатора и становится фазой A_k компенсационной обмотки КО (рис. 1, в).

В качестве примера далее рассматривается лабораторная модель плоского трехполюсного МГД-насоса с алюминиевым вторичным элементом (ВЭ) и трехфазной обмоткой индуктора. Параметры насоса: длина индуктора – 0.29 м; ширина – 0.06 м; ширина паза – 0.01 м;

глубина паза – 0.041 м; толщина алюминиевого слоя (ВЭ) – 0.007 м; световой зазор между индуктором и ВЭ – 0.009 м; число пазов на полюс и фазу – 2; число пазов – 18; число витков в пазу (в секции однослойной обмотки) – 48; фазное напряжение – 70 В; частота питающего тока – 50 Гц. После преобразования обмотки число фаз становится равным 6 (3 силовых и 3 компенсирующих), а число витков в пазу при том же напряжении – 144.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма фазных токов и напряжений на комплексной плоскости. Индуктор насоса питается от симметричной системы фазных напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Токи образованных («новых») фаз обозначены буквами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ с индексами «с» (силовая фаза) или «к» (компенсирующая фаза) соответственно.

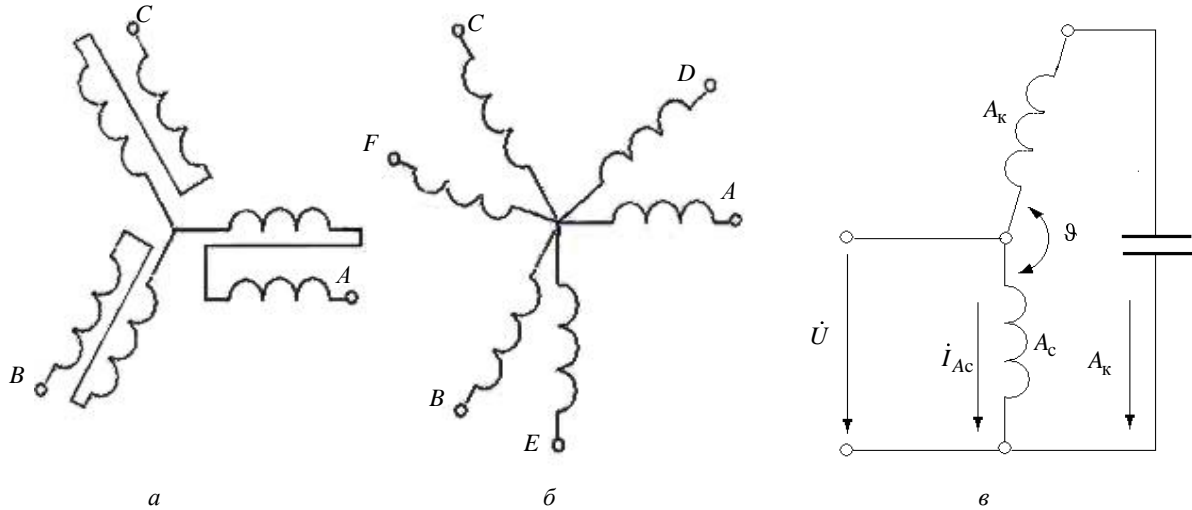


Рис. 1

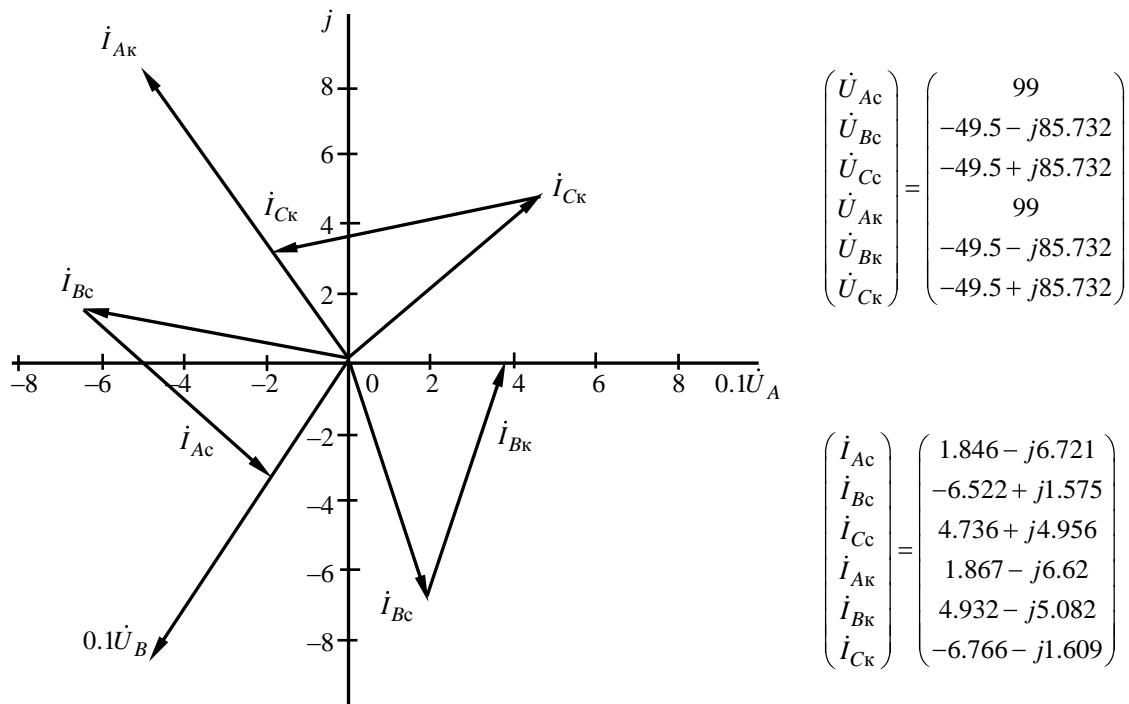


Рис. 2

Питающий фазный ток равен векторной сумме токов силовой и компенсирующей ветвей, т. е. является практически активным. Видно, что реактивные части силовой и компенсирующей ветвей каждой фазы приблизительно равны по значению и противоположны по знаку, т. е. выполняется практически полная компенсация реактивной мощности.

На рис. 3 показана векторная диаграмма напряжений на емкостях и в фазах компенсационной обмотки, совмещенная с комплексной плоскостью (напряжения уменьшены в $\dot{U}_{Cемк}$ 10 раз). Можно видеть, что напряжения на емкостях в фазах $\dot{U}_{Аемк}$, $\dot{U}_{Вемк}$, $\dot{U}_{Семк}$ превышают напряжения на фазах обмотки $\dot{U}_{Аобм}$, $\dot{U}_{Вобм}$, $\dot{U}_{Собм}$ и приложенные напряжения источника питания $\dot{U}_{Ак}$, $\dot{U}_{Вк}$, $\dot{U}_{Ск}$. Естественно, что в этом случае емкости, необходимые для компенсации реактивной мощности, уменьшаются по сравнению с вариантом классической схемы компенсации.

В табл. 1 приведены результаты расчета основных показателей насоса для различных вариантов компенсации его реактивной мощности при одинаковой плотности тока в обмотке индуктора (т. е. его одинаковом нагреве). В четвертом столбце показаны полные мощности, потребляемые индуктором, а в шестом – емкости, требуемые для полной компенсации реактивной мощности. Первые две строки относятся к общепринятой схеме компенсации реактивной мощности включением конденсаторов на входе индуктора при питании его от источника симметричной трехфазной системы токов (ИТ) или напряжений (ИН). Далее приведены показатели при организации параллельных ветвей с внутренней компенсацией реактивной мощности (3-я строка). В двух последних строках приведены аналогичные показатели насоса при замене алюминиевого ВЭ цинковым. Критериями оценки качества схем являются пусковое усилие, действующее на ВЭ, и активная мощность, выделяющаяся в нем. Плотность тока рассчитывается как среднеквадратичная для всех фаз.

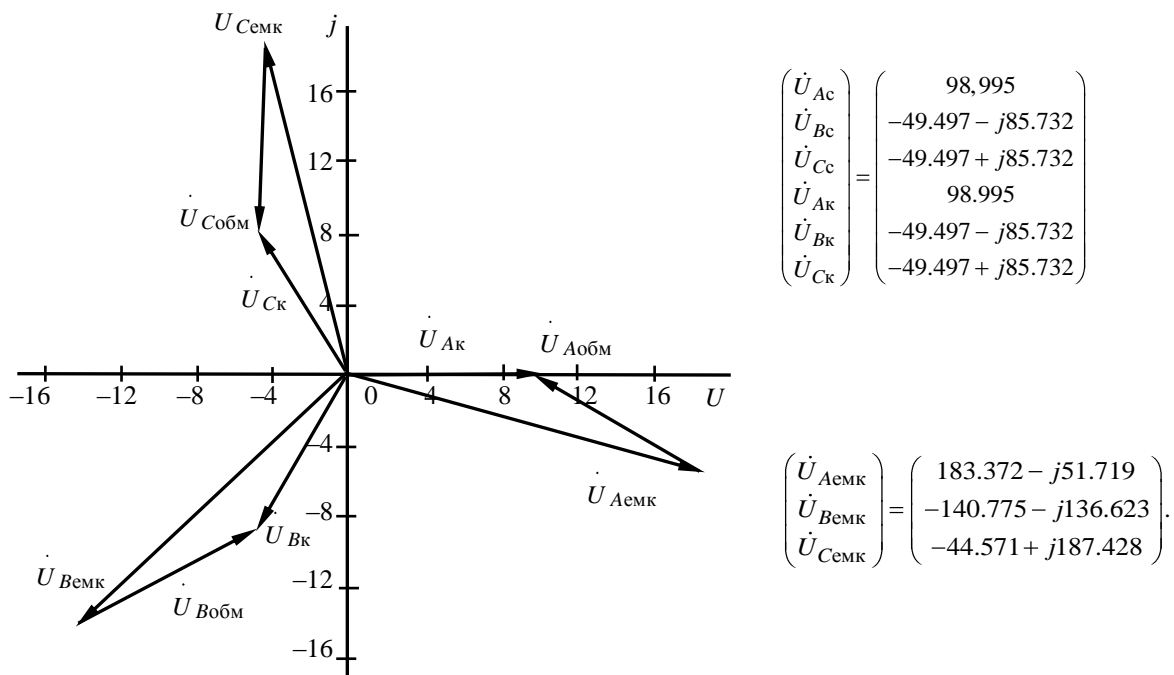


Рис. 3

Таблица 1

Питание	Плотность тока, А/мм ²	Пусковое усилие, Н	Мощность, В · А	Коэффициент мощности, о. е.	Требуемая емкость, мФ
От ИТ	4.474	21.35	543.9 + j2082	0.253	1.355
От ИН	4.473	21.37	543 + j2082	0.253	1.353
От ИН с внутренней компенсацией	4.471	23.07	556 + j1.7	1	0.341
От ИН (цинк)	4.313	21.555	538 + j1928	0.269	1.2
От ИН с внутренней компенсацией (цинк)	4.312	23.578	555 - j50.74	0.996	0.33

Из анализа таблицы следует, что организация параллельных ветвей в фазах, изменение начал и концов одного комплекта параллельных ветвей местами и включение емкостей в фазы полученной компенсационной обмотки дает положительные результаты. Усилие, действующее на ВЭ, увеличивается в 1.08 раза по сравнению с базовым вариантом 1. Уменьшение вдвое удельной электрической проводимости ВЭ (две последние строки) практически не ухудшает показатели двигателя с внутренней компенсацией реактивной мощности.

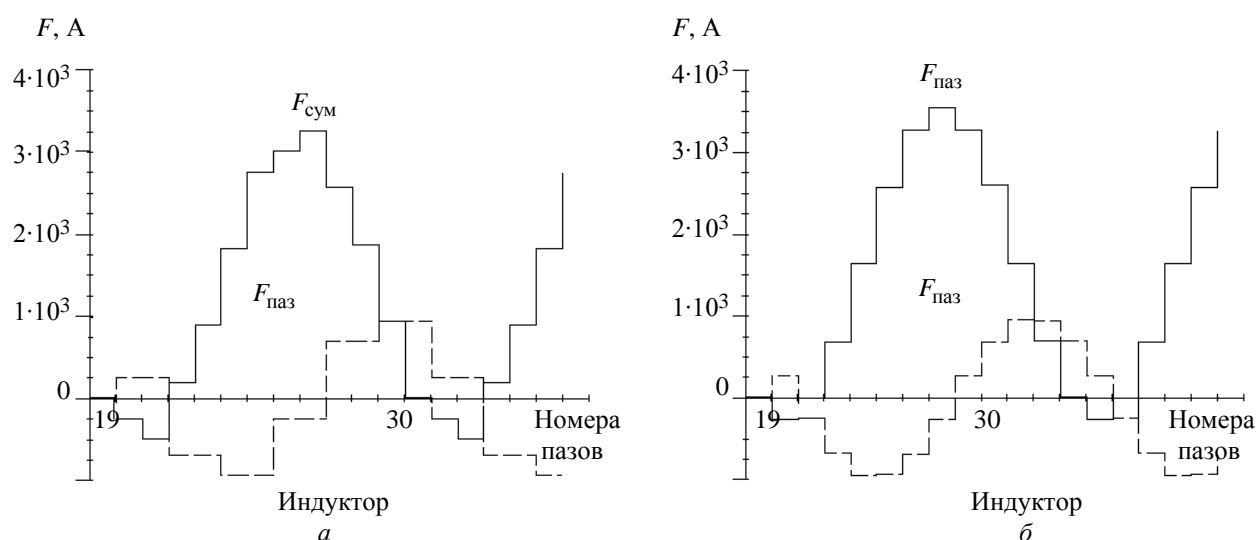


Рис. 4

На рис. 4 показаны кривые распределения пазовых $F_{\text{паз}}$ и полных $F_{\text{сум}}$ магнитодвижущих сил некомпенсированного (а) и компенсированного (б) насосов по пазам индуктора.

Можно видеть, что в кривых пазовых и полных МДС компенсированного насоса высшие гармонические выражены более слабо. Это обуславливает его более высокие энергетические показатели по сравнению с насосом, в котором реактивная мощность компенсируется традиционным способом.

Вторым примером индукционной МГД-машины является электромагнитный вращатель металлического расплава в составе индукционного плавильного агрегата [2]–[6]. На рис. 5 изображена схема многофункционального плавильного агрегата, где 1 – индуктор индукционной тигельной печи; 2 – индуктор электромагнитного вращателя (ЭМВ); 3 – летка; 4 – сливная летка; 5 – футеровка плавильной камеры.

Агрегат имеет два индуктора: один из них (на рис. 5 обозначен цифрой 1) выполняет функцию нагрева и плавки металла (греющий), а второй (на рис. 5 обозначен цифрой 2) – функцию электромагнитного управления циркуляцией металла (вращающий торцевой на рис. 5, а или вращающий боковой на рис. 5, б). ЭМВ с бегущим вдоль его активной поверхности магнитным полем выполняет функцию вращения жидкометаллической загрузки в тигле. В образовавшуюся лунку металлической подложки (металл) через отверстия в крышке загружаются оксид металла (реагент) и восстановитель. В слое шлака происходит технологическая операция восстановления металла из оксида [3].

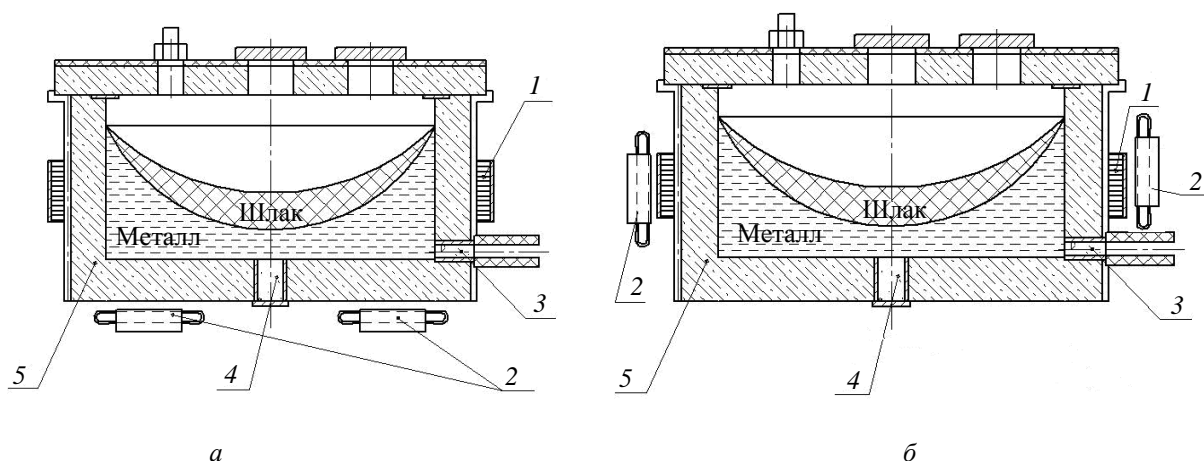


Рис. 5

В табл. 2 приведены некоторые результаты математического моделирования торцевого трехфазного электромагнитного вращателя в составе индукционного плавильного агрегата. Индуктор расположен под днищем тигля, заполненного расплавом стали. Внутренний диаметр тигля – 2 м; ширина сердечника индуктора – 0.4 м; немагнитный зазор между индуктором и металлом – 0.3 м; число пазов – 24; высота паза – 0.15 м, его ширина – 0.13 м; число полюсов – 2. Исследование выполнено на основе метода детализированных схем замещения. Рассмотрены варианты последовательного соединения секций в фазе, когда число пазов на полюс и фазу $q = 4$, а также параллельного соединения секций с организацией трех фаз компенсационной обмотки (КО) с $q = 2$, включенных последовательно на компенсирующие емкости, и трех фаз силовой обмотки (СО) также с $q = 2$.

Из табл. 2 можно заключить, что требуемая емкость для полной компенсации реактивной мощности по схеме поворотного трансформатора (3-я строка «с емкостями в КО») приблизительно в 4 раза меньше, чем по обычной схеме поперечной компенсации (первая и вторая строки). Это легко объясняется тем, что при последовательном включении емкости и фазы КО напряжение на ней превышает приложенное из сети. Следует также отметить, что тяговое (вращающее) усилие для этой схемы включения возрастает на 5...6 % по сравнению с традиционной схемой.

К недостаткам этой схемы включения можно отнести ее большую чувствительность к выбору компенсирующей емкости в КО, что требует корректного определения таких параметров обмотки ЭМВ, как активное и реактивное сопротивление фазы индуктора.

Схема	Параметр					
	Плотность тока, А/мм ²	Тяговое усилие, кН	Мощность, кВт · А	Коэффициент мощности	Требуемая емкость, Ф	Напряжение фазы, В
Последовательное соединение секций	3.70	5.49	233.4 + j2793	0.083	0.136	820
Без емкостей в КО	3.70	5.52	237.2 + j2869	0.082	0.136	820
С емкостями в КО	3.70	5.79	242 – j16.9	0.998	0.033	820
С емкостями в СО	3.83	5.56	242 – j16.94	0.998	0.033	820

При использовании внутренней компенсации реактивной мощности наблюдается увеличение тяговых усилий в расплаве плавильного агрегата примерно на 6 %, что говорит о преимуществе использования этого способа по сравнению с традиционной поперечной компенсацией. Кроме того, емкость компенсационных установок гораздо меньше при использовании внутренней компенсации.

В целом можно заключить, что предлагаемый в [1] способ внутренней компенсации реактивной мощности более эффективен в сравнении с традиционным, особенно для несимметричных индукционных машин типа многофазных МГД-насосов, электромагнитных перемешивателей и вращателей металлических расплавов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на оказание услуг (выполнения работ) «Разработка теоретических основ и математическое моделирование автоматизированных технологий и агрегатов по производству новых эффективных нано- и конструкционных материалов с применением плазменных, акустических и индукционных методов обработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин В. И., Чуенко Р. Н., Гаврилюк В. В. Эффект внутренней компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // Электротехника. 2010. № 8. С. 30–36.
2. Многофункциональные плавильные агрегаты и их возможности / Ф. Н. Сарапулов, В. Г. Лисиенко, С. Ф. Сарапулов и др. // Литейщик России. 2009. № 9. С. 39–42.
3. Многофункциональный плавильный агрегат для мини-металлургических предприятий / А. А. Идиятулин, Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов и др. // Промышленная энергетика. 2010. № 5. С. 7–11.
4. Одномерная динамическая модель ИТП / А. А. Идиятулин, С. М. Фаткуллин, В. Э. Фризен, Ф. Н. Сарапулов // Электротехника. 2010. № 5. С. 37–42.
5. Идиятулин А. А., Сарапулов С. Ф. Моделирование электромагнитного вращателя металлического расплава // Промышленная энергетика. 2010. № 5. С. 11–14.
6. Моделирование торцевого индукционного вращателя металлического расплава / А. А. Идиятулин, С. Ф. Сарапулов, Ф. Н. Сарапулов, С. М. Фаткуллин // Электротехника. 2009. № 7. С. 38–43.

A. A. Idiyatulin, S. F. Sarapulov, F. N. Sarapulov, F. E. Tarasov, V. E. Frizen

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MAGNETOHYDRODYNAMIC MACHINES DUE TO INTERNAL REACTIVE POWER COMPENSATION

The article describes a means of the internal reactive power compensation. A given comparative analysis with traditional cross-reactive power compensation. It is proposed to use this method for induction machines with an increased air gap.

Magnetohydrodynamic machine, compensating windings, induction crucible furnace, coil, electromagnetic rotator, multipurpose melting unit