

С. Ф. Сарапулов, Ф. Н. Сарапулов, И. Е. Родионов,  
 ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента  
 России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)

П. Шымчак,  
 Западнопоморский технологический университет (г. Щецин, Польша)

## ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Известно [1], что линейные асинхронные двигатели (ЛАД) промышленного назначения и транспорта имеют низкий коэффициент мощности  $\cos\varphi$  из-за повышенного немагнитного зазора и влияния продольного краевого эффекта. Компенсация реактивной мощности двигателя обычно выполняется по общепринятой схеме путем включения конденсаторов на внешние зажимы статора. Рядом авторов [2, 3] предлагается внутренняя компенсация, когда при числе пазов на полюс и фазу  $q > 1$  можно каждую исходную фазу разделить на две новые с другим значением  $q$  (рис. 1а). При этом одна ветвь исходной фазы А («новая» фаза  $A_c$ ) остается силовой, а вторая  $A_k$  после смены начала и конца замыкается на емкость  $C$  по схеме поворотного трансформатора и становится компенсирующей фазой  $A_k$ .

В качестве примера ниже рассматривается трехполюсный линейный асинхронный двигатель с параметрами: длина индуктора 0,29 м, ширина 0,06 м, ширина паза 0,01 м, глубина паза 0,041 м, толщина алюминиевого слоя вторичного элемента (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 шести (три силовые и три компенсирующие). Расчет характеристик двигателя проводился методом детализированных электрических и магнитных схем замещения [1].

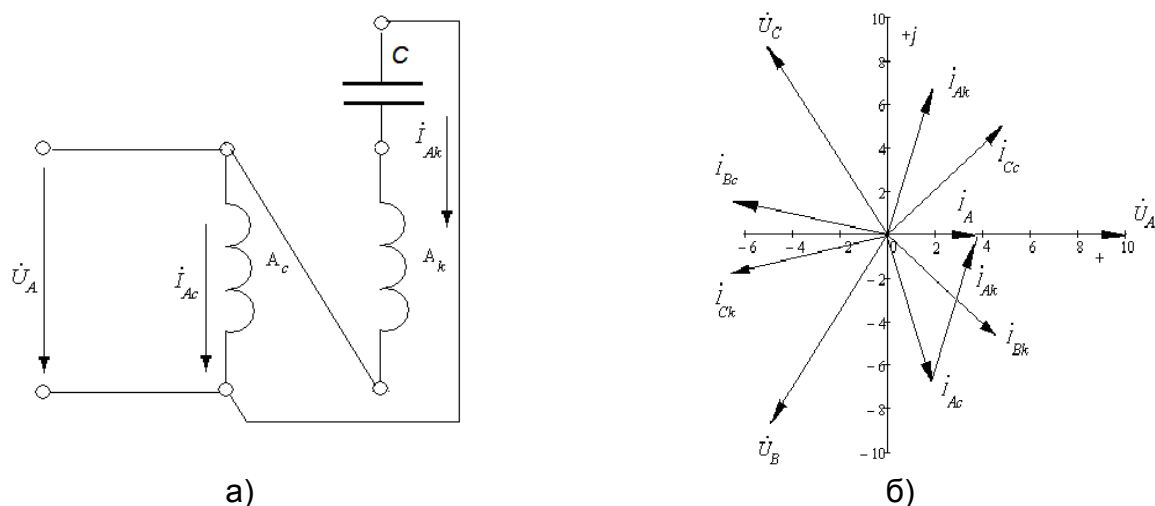


Рис.1. а) Схема включения фазы А; б) векторная диаграмма напряжений и токов фаз обмоток (векторы напряжений уменьшены в 10 раз)компенсационной обмотки

На рис. 1б приведена векторная диаграмма фазных токов и напряжений. Индуктор ЛАД питается от симметричной системы фазных напряжений. Токи параллельных ветвей («новых» фаз) обозначены соответствующими буквами с индексами с (силовая фаза) или k (компенсирующая фаза). 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 равны по величине и противоположны по знаку, т. е. выполняется практически полная компенсация реактивной мощности. При этом напряжение на емкости превышает напряжение на фазе обмотки и приложенное напряжение. Естественно, что в этом случае емкости, необходимые для компенсации реактивной мощности, уменьшаются по сравнению с вариантом классической схемы.

В таблице 1 приведены результаты расчета основных показателей ЛАД для различных вариантов компенсации его реактивной мощности при одинаковой плотности тока в обмотке индуктора (т. е. одинаковых условиях нагрева) и неподвижном вторичном элементе («заторможенном роторе»). 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 (3-я строка) и с общепринятой (4-я строка) компенсацией реактивной мощности (см. ниже). Критериями оценки качества схем являются пусковое усилие, действующее на ВЭ. Плотность тока рассчитывается как среднеквадратичная для всех фаз обмотки индуктора.

Таблица 1

Основные показатели ЛАД для различных вариантов компенсации реактивной мощности

2р = 3, частота 50 Гц	Плотность тока, А / мм <sup>2</sup>	Пусковое усилие, Н	Мощность, ВА	Сosφ	Требуемая емкость, мФ
От ИТ, q = 2, m = 3	4,47	21,350	543,9 + j 2082	0,253	1,355
От ИН, q = 2, m = 3	4,47	21,370	543,0 + j 2082	0,253	1,353
От ИН, с С, q = 1, m = 6	4,47	23,070	556,0 + j 1,70	1,000	0,341
От ИН, без С, q = 1, m = 6	4,47	21,125	542,0+ j 1959	0,267	1,273

Из анализа данных таблицы следует, что питание индуктора симметричной системой фазных напряжений при последовательном соединении всех секций фазы обмотки дает лучшие показатели. Организация параллельных ветвей в фазах ухудшает показатели двигателя (третий вариант), поскольку токи в ветвях фазы, расположенных в соседних пазах приобретают сдвиг во времени. Включение емкостей в компенсирующие ветви-фазы и изменение начал и концов этих ветвей местами дает наилучшие результаты. Усилие, действующее на ВЭ, увеличивается по сравнению с базовым вариантом 1 при той же плотности тока в обмотке индуктора.

В таблице 2 приведены характеристики компенсированного и некомпенсированного двигателей при различных скоростях движения вторичного элемента ( $V_{\text{синх}} = 9,6$  м/с). Во всем диапазоне скоростей параметры компенсированного двигателя превосходят его параметры без применения внутренней компенсации. При этом для полной компенсации реактивной мощности требуется корректировать значение компенсирующей емкости в функции скорости, хотя и в узком диапазоне.

Таблица 2

Характеристики компенсированного и некомпенсированного двигателей при различных скоростях движения вторичного элемента

Параметры	Скорость, м/с			
	0	6	9	12
$F_{\text{КОМП}}/F_{\text{НЕКОМП}}, \text{ Н}$	17,65/16,11 (1,095)	17,45/15,8 (1,100)	8,14/7,37 (1,100)	(-9,4)/(-8,78) (1,080)
$\text{Cos } \varphi_{\text{КОМП}}/\text{Cos } \varphi_{\text{НЕКОМП}}, \text{ о.е.}$	1/0,267	1/0,254	1/0,197	1/0,097
$3 C, \text{ мкФ}$	255,00	239,00	222,00	219,00

На рис. 2 приведены зависимости усилия от скорости движения ВЭ. Можно видеть, что во всем диапазоне скоростей усилия компенсированного двигателя превосходят усилия двигателя некомпенсированного, в том числе и в зоне перехода его в генераторный режим работы. Следует отметить характерную особенность механической характеристики линейного асинхронного двигателя – ее переход через нулевое значение скорости в точке, отличной от скорости синхронной. Эта особенность вызвана влиянием продольного краевого эффекта, обусловленного разомкнутостью магнитопровода линейного индуктора.

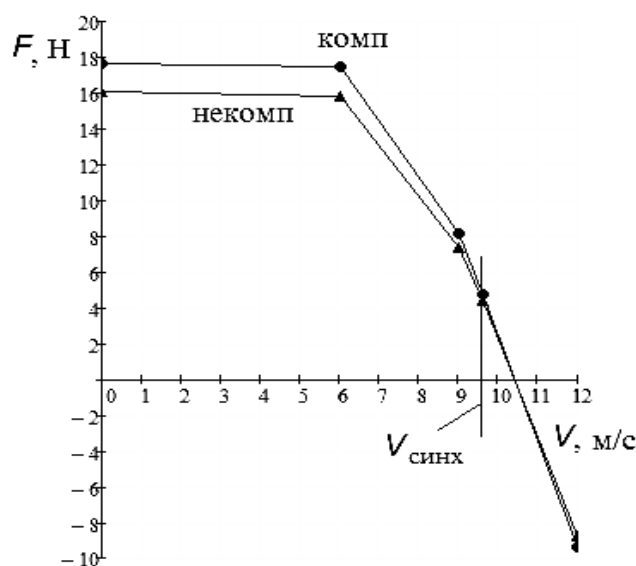


Рис. 2. Механические характеристики ЛАД

Влияние продольного краевого эффекта в ЛАД демонстрирует рис. 3. На нем показаны распределения по длине индуктора (аналог длине расточки статора круговой машины) магнитной индукции в зазоре  $B$ , тока в «стержне» вторичного элемента (выделенном участке вторичного элемента шириной, равной зубцовому делению индуктора, и длиной, равной ширине индуктора)  $I$  и тягового усилия  $F$ , приходящегося на одно зубцовое деление индуктора.

В целом можно заключить, что предлагаемый в [2] способ внутренней компенсации реактивной мощности более эффективен в сравнении с традиционным, особенно для несимметричных индукционных машин типа линейных асинхронных двигателей. Следует также отметить, что указанный способ компенсации реактивной мощности может быть рекомендован к использованию в целом ряде электромеханических преобразователей энергии, встроенных в технологическую цепочку обработки металлических расплавов. К ним относятся многофазные магнетогидродинамические насосы, электромагнитные перемешиватели металлических расплавов при литье заготовок, индукторы многофункциональных плавильных агрегатов на основе индукционных тигельных печей для жидкофазного восстановления металлов из оксидов и т. п.

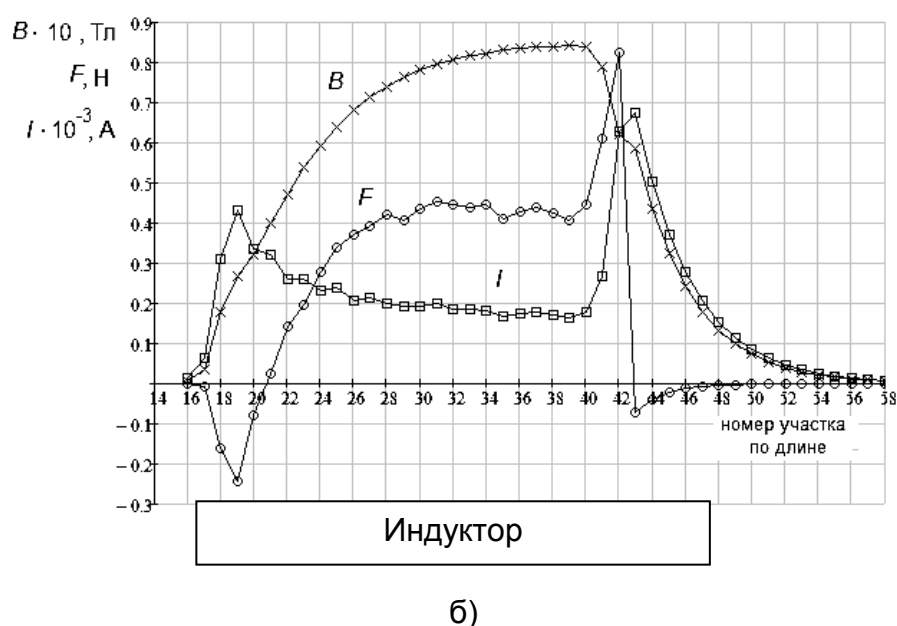
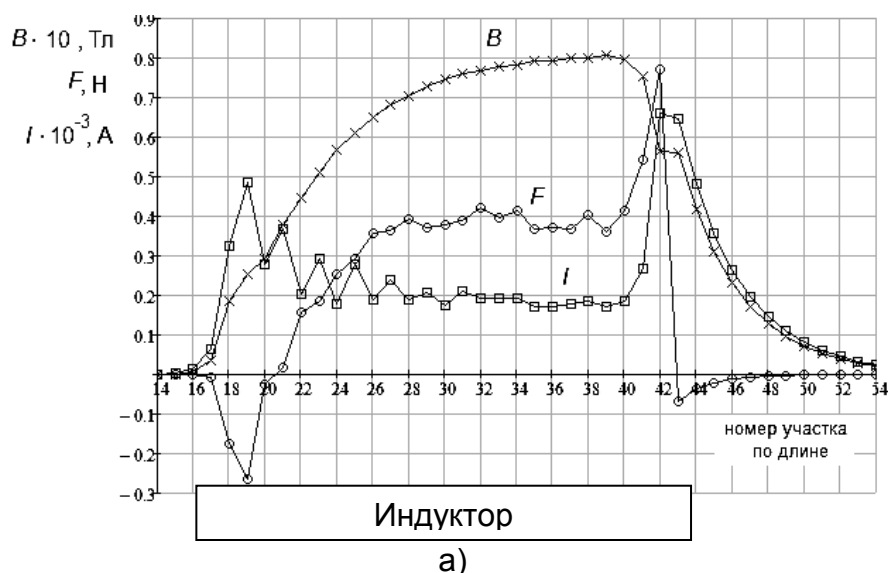


Рис. 3. Распределения дифференциальных величин:  
 (а) по длине индуктора некомпенсированного и (б) по длине индуктора  
 компенсированного ЛАД

#### Список использованных источников

1. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Мишин В. И., Чуенко Р. Н., Гаврилюк В. В. Эффект внутренней компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // Электротехника. № 8. 2010. С. 30–36.
3. Мугалимов Р. Г., Губайдуллин А. Р., Мугалимова А. Р. Электроприводы на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности для волочильных станков. // Электротехника. 2009. № 10. С. 122–127.

**Ю. М. Денчик, М. С. Давыдов,**  
 ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
 (г. Новосибирск, Россия)

**Н. А. Ковалева,**