

УДК 621.313.333

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНЫХ ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБМОТКОЙ ИНДУКТОРА

Набиев Ф.М., д.т.н., доц.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

Az.1007, Азербайджан, г. Баку, пр. Азадлык, 111/12

E-mail: fuadnabi@gmail.com

Розглядається математична модель двофазного лінійного асинхронного двигуна з послідовною обмоткою індуктора і паралельною обмоткою вторинного елемента, яка дозволяє аналізувати характеристики лінійного асинхронного двигуна, розподіл електромагнітних сил у межах одного полюса в залежності від їх розташування по довжині індуктора. Досліджується участь кожного полюса в створенні інтегральних сил всього двигуна, приводиться порівняльний аналіз характеристик лінійного асинхронного двигуна з різними числами полюсів.

Ключові слова: елементарний двигун, кінцеві ефекти, асиметрія струмів.

The mathematical model of two-phase linear asynchronous motor with a series winding of inductor and a parallel winding of a secondary element, which allows analyzing the characteristics of linear asynchronous motor, the distribution of electromagnetic forces within the limits of one pole, by considering the position along the length of the inductor. Participation of each pole in creation of integrated forces of all motors has been investigated and the comparative analysis of characteristics of linear asynchronous motor with various numbers of poles has been conducted.

Key words: elementary motor, end effects, asymmetry of phase currents.

Введение. Двухфазные линейные асинхронные двигатели (ЛАД) часто находят применение для транспортировки, ускорения и замедления различных масс. При этом часто производится обработка деталей во время их перемещения. Соответственно производительность, а также качество обработки зависят от механических характеристик линейного электропривода, плавность которых определяется соотношением всех электромагнитных величин. Поэтому ЛАД в таких условиях должны обладать определенной динамической механической характеристикой, имеющей минимальные колебания. Эти требования относятся как к переходным, так и к стационарным режимам.

Анализ предыдущих исследований. При последовательном соединении обмоток индуктора ЛАД, уравнения, записанные на базе теории цепей, позволяют рассчитывать интегральные характеристики двигателя, однако не дают возможность анализировать индукции магнитного поля по длине воздушного зазора, а также электромагнитные силы отдельных полюсов, в итоге которых усложняется усовершенствование двигателя.

Цель работы – разработка математической модели на основе теории цепей, которая позволит вести детальный анализ по длине двухфазных линейных двигателей с учетом особенностей распределения обмоток индуктора и конструкций вторичного элемента.

Материал и результаты исследования. С этой целью, ЛАД представляется в виде элементарных двигателей с числом полюсов, равным 1. Т.е. каждый полюс, содержащий полу-фазы А и В на индукторе, а и б соответственно на вторичном элементе, рассматривается в виде отдельного элемен-

тарного двигателя с всевозможными магнитными связями друг с другом. Следующий элементарный двигатель при катушечной обмотке индуктора содержит вторые половины фаз соответственно X У и x у. Многочисленные электромагнитные расчеты показывают, что на практике достаточно учитывать магнитные взаимные связи только между соседними элементарными двигателями. Кроме того в ненасыщенных двухфазных машинах при электрическом и пространственном сдвиге фаз на 90⁰ градусов, взаимные индуктивности между разноименными фазами одного и того же элементарного двигателя равны нулю [1]. Для учета входа контуров вторичного элемента в область воздушного зазора и выхода из него, пространственная модель ЛАД снабжается двумя крайними контурами.

С целью упрощения математической модели уравнения целесообразно записать в неподвижной координатной системе, жестко связанной с индуктором. В этой системе уравнения баланса напряжений содержит э.д.с. движения, которая имеет определенный физический смысл. Например, напряжение фазы а вторичного элемента складывается от трансформаторной э.д.с. ($d\psi/dt$), наведенный при изменении потокосцепления той же фазы по времени и от э.д.с. движения, которая образуется при пересечении контуров фазы а текущего элементарного двигателя, зоны фазы в предыдущего двигателя в виде $\psi_b \cdot V$. В таких случаях необходимо записать системы уравнений для всех элементарных двигателей совместно с крайними..

Число дифференциальных уравнений при этом равно $(4pm+N+M)$, где p, m, N, M – соответственно количество полюсов, фаз и крайних контуров.

При последовательном соединении обмоток индуктора уравнения баланса напряжений можно свести к одному по каждой фазе, имея в виду, что токи одинаковы в одноименных фазах всех элементарных индукторов. Однако для вторичного элемента с короткозамкнутой обмоткой или массивного типа этого делать нельзя и уравнения необходимо записать для каждого элементарного двигателя включая, левые и правые контуры. Таким образом математическая модель двухфазного ЛАД с короткозамкнутой обмоткой при последовательном соединении катушек фаз индуктора и короткозамкнутом вторичном элементе с учетом концевых эффектов примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_{Ai} &= i_{Ai} R_{Ai} + \frac{d\psi_{Ai}}{dt}, \\
 U_{Bi} &= i_{Bi} R_{Bi} + \frac{d\psi_{Bi}}{dt}, \\
 U_{Xi} &= i_{Xi} R_{Ai} + \frac{d\psi_{Xi}}{dt}, \\
 U_{Yi} &= i_{Yi} R_{Yi} + \frac{d\psi_{Yi}}{dt}, \\
 U_{ai} &= i_{ai} R_{ai} + \frac{d\psi_{ai}}{dt} + v\psi_{y,i-1}, \\
 U_{bi} &= i_{bi} R_{bi} + \frac{d\psi_{bi}}{dt} - v\psi_{ai}, \\
 U_{xi} &= i_{xi} R_{xi} + \frac{d\psi_{xi}}{dt} + v\psi_{y,i}, \\
 U_{yi} &= i_{yi} R_{yi} + \frac{d\psi_{yi}}{dt} - v\psi_{xi}, \\
 U_{nN} &= i_{nN} R_{nN} + \frac{d\psi_{nN}}{dt} + v\psi_{n,N-1}, \\
 U_{nM} &= i_{nM} R_{nM} + \frac{d\psi_{nM}}{dt} - v\psi_{n,M-1}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Из систем уравнений (1) видно, что если в случае последовательной обмотки вторичного элемента возможно считать потокосцепления одноименных фаз элементарных двигателей одинаковыми благодаря равенству токов, то в машинах с короткозамкнутой обмоткой аналогичные потокосцепления получаются совершенно различными. Т.к. в выражениях $U_{a1}, U_{a2}, \dots, U_{ap}$ фигурируют составляющие эдс движения $\psi_{a, y1, \dots, yp-1}$, когда в машинах вращательного движения в место них было бы только ψ_y . Эти составляющие иллюстрируют иными словами затухание волн входного концевого эффекта. Т.е. выражение для U_{a1} описывает режим короткого замыкания, который передается на U_{b1} через составляющие ψ_{a1} , далее на U_{x1} через ψ_{b1} , на U_{y1} – через ψ_{x1} и т.д.

Решением этих уравнений можем рассчитывать характеристики отдельных промежуточных двигателей а также индукции магнитного поля в различных участках по длине воздушного зазора в пределах одной фазы одного полюса и можем убедиться в их неравномерности, что в общем известно из многочисленных публикаций.

Уравнения потокосцеплений для двухфазных машин записываются в традиционной форме [2].

При расчете без учета насыщения ($\mu = \infty$) в

двухфазном ЛАД полные и взаимные индуктивности фаз среднего и крайних двигателей практически равны, что свидетельствует об отсутствии в этих двигателях первичного концевого эффекта. Однако при учете реального магнитного состояния сердечников, индуктивные параметры элементарных двигателей различаются. В этом случае взаимные индуктивности между разноименными фазами крайних элементарных двигателей могут отличаться от нуля и пренебрежение ими становится неоправданным. В то же время взаимные индуктивности между фазами средних элементарных двигателей подчиняются вышеописанным закономерностям, то есть $M_{AB2}=0$ при $\gamma=90^\circ$ эл. Это является проявлением первичного концевого эффекта в двухфазных ЛАД в виде асимметрии взаимных индуктивностей. Первичный концевой эффект возникает также в виде асимметрии полных индуктивностей.

Анализ действия вторичного концевого эффекта является наиболее сложным, который может быть значительно упрощен, если принять, что взаимные индуктивности между левым контуром и контурами активной зоны равны нулю: $M_{лА}=0, M_{ла}=0$. В случае биметаллического вторичного элемента принятие такого допущения может иметь место, если пренебречь торцевыми рассеяниями. Тогда наличие тока растекания не имеет значения и его можно не определять. Следовательно, в таком случае $\psi=0$. Однако, при наличии ферромагнитного сердечника на вторичном элементе, компенсационных обмоток и шунтирующих участков на индукторе, расчет необходимо произвести по полным уравнениям, учитывающим ток левого контура и магнитные взаимные связи. А при наличии зубцов и реальных контуров на вторичном элементе, необходимо определять также период их входа в область воздушного зазора.

В этом случае ток фазы в элементарного вторичного элемента с номером $j-1$ равен току левого контура $I_{bj-1}=I_n$, а ток фазы В этого же элементарного индуктора отсутствует. Поэтому, слагаемая $M_{Bbj-1} \& I_{bj-1}$ в этой системе также отсутствует. Если пренебречь токами растекания, уравнение напряжения для фазы а превратится в уравнение короткого замыкания.

Известно, что статические режимы электрических машин получают из дифференциальных уравнений, если в них оператор дифференцирования $\partial/\partial t$, заменить на $j\omega$. Прделав эти операции, систему уравнений для четырехполюсного двигателя без учета токов растекания можем записать следующим образом.

Одноименные параметры разных фаз всех элементарных двигателей в двухфазных ЛАД при отсутствии насыщения магнитопровода, независимо от их места расположения практически одинаковы. Тогда можем принимая следующие обозначения: $R_1, X_1, R_2, X_2, (R_i+jX_i) = Z_i$ – соответственно активные, индуктивные и полные сопротивления пер-

вичной и вторичной обмоток элементарных двигателей; $X_{Aa1}=X_{Aa2}=X_{Bb1}=X_{Bb2}=X_m$; $M_{Aa1}=M_{Aa2}=M_{Bb1}=M_{Bb2}=M$ – соответственно взаимное индуктивное сопротивление и взаимная индуктивность между одноименными фазами элементарного индуктора и вторичного элемента; $L_{b1}=L_{a1}=L_{a2}=L_{b2}=L_2$ -полные индуктивности фаз элементарного вторичного элемента, систему уравнений записать в следующем более упрощенном виде:

$$[U_i]=[ZM]*[I_i]$$

U_{Γ}	Z_{Γ}	$jX_{A\Gamma}$	0	0	0	0	0	0	0	0	I_{Γ}	
U_A	0	$2pZ_1$	0	$2pjX_m$	0	$2pjX_m$	0	$2pjX_m$	0	$2pjX_m$	0	I_A
U_B	0	0	$2pZ_1$	0	$2pjX_m$	0	$2pjX_m$	0	$2pjX_m$	0	I_B	
U_{a1}	vL_{Γ}	jX_m	0	Z_2	0	0	0	0	0	0	I_{a1}	
U_{b1}	0	$-vM$	jX_m	$-vL_2$	Z_2	0	0	0	0	0	I_{b1}	
U_{a2}	0	jX_m	vM	0	vL_2	Z_2	0	0	0	0	I_{a2}	
U_{b2}	0	$-vM$	jX_m	0	0	$-vL_2$	Z_2	0	0	0	I_{b2}	
U_{a3}	0	jX_m	vM	0	0	0	vL_2	Z_2	0	0	I_{a3}	
U_{b3}	0	$-vM$	jX_m	0	0	0	0	$-vL_2$	Z_2	0	I_{b3}	
U_{a4}	0	jX_m	vM	0	0	0	0	0	vL_2	Z_2	I_{a4}	
U_{b4}	0	$-vM$	jX_m	0	0	0	0	0	$-vL_2$	Z_2	I_{b4}	

При увеличении числа полюсов эта матрица продолжается аналогичным образом по вертикали и горизонтали. Существующая в матрице закономерность распределения элементов, позволяет решать систему с неограниченным числом уравнений в среде программы MATLAB с помощью циклических операторов.

Причем уравнения записываются для каждого элементарного двигателя, что означает их количество также равно $2Pm+M+N$, где $2P$ - число полюсов, m -количество фаз, N -число левых, M -число правых контуров.

На рис. 1 и 2 приведены характеристики двухфазных ЛАД, рассчитанные по вышеописанной модели, с $2P=4$ и $2P=6$.

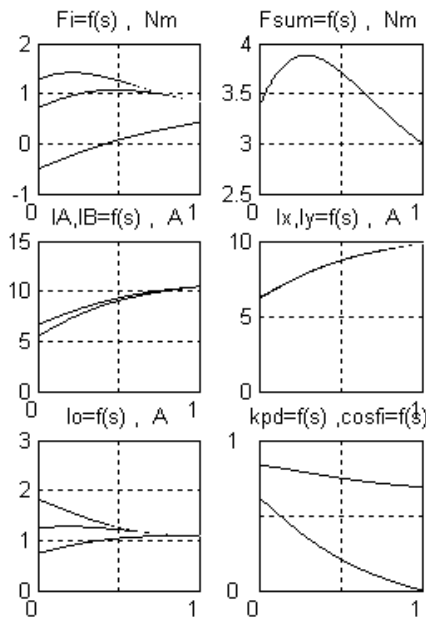


Рисунок 1 – Характеристики линейного асинхронного двигателя 2P=4

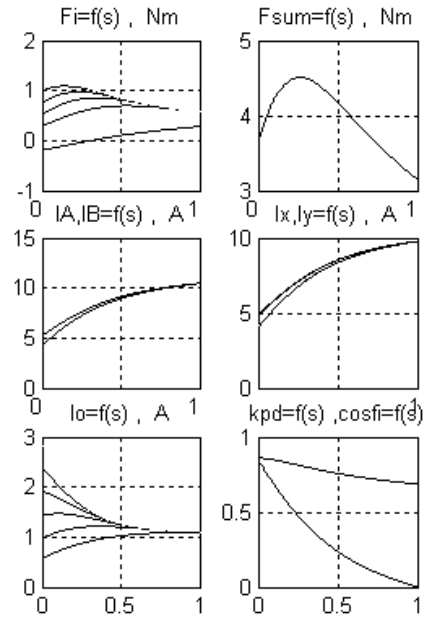


Рисунок 2 – Характеристики линейного асинхронного двигателя 2P=6

Первое семейство кривых представляют зависимости тяговых сил элементарных двигателей от скольжения.

Как видно из рис. 1 и 2, первый элементарный двигатель (нижняя кривая) меньше всего участвует в создании полезной тяговой силы. В диапазоне скольжений меньше 0.3 она приобретает отрицательное значение, т.е. становится тормозной силой. Во всем диапазоне скольжений сила тем больше, чем элементарный двигатель дальше от входного конца индуктора. Форма интегральной силы, показанной на рис. 1 и 2, в принципе похожа характеристике обычных асинхронных машин. Однако ЛАД в этом случае развивает полезную силу при выше синхронной скорости.

На рис. 3, 4 показаны зависимости соответственно токов индуктора и приведенных элементарных вторичных элементов от скольжения. Как видно, даже при симметричных параметрах наличие разомкнутых концов индуктора вносит определенную асимметрию в фазные токи как индуктора, так и вторичного элемента. Кроме того, токи вторичных элементов при синхронной скорости не равны нулю, что является причиной создания полезной тяговой силы при этой скорости.

На рис. 5 представлены зависимости токов намагничивания элементарных двигателей от скольжения. Аналогично зависимостям электромагнитных сил, токи намагничивания также, в области больших скольжений ($s > 0.5$) практически равны, а в меньших значениях скольжений резко отличаются, возрастая от входного к выходному концу.

На рис. 3 показаны аналогичные характеристики двухполюсного двигателя. Как видно форма зависимостей электромагнитных сил резко отличается от зависимостей 6-ти полюсного двигателя. Т.к. при этом входной элементарный двигатель в большем

диапазоне скольжений ($s < 0.6$) является тормозной, благодаря чему интегральная сила становится очень мягким аналогично асинхронным двигателям с повышенным активным сопротивлением обмотки ротора. Асимметрия фазных токов индуктора в 6 полюсном двигателе наблюдается при скольжениях ($s < 0.2$), когда в 2 полюсных двигателях она существует практически во всем диапазоне скольжений. Кроме того если у первых ток холостого хода равен примерно 50% тока короткого замыкания, у вторых он равен 80%. Такой двигатель практически не применим. Он может работать только при больших значениях скольжений, близких к режиму короткого замыкания. Максимальное значение КПД у этих двигателей приходится в область скольжения 0.2-0.6, и оно всегда меньше 15%, когда 6 полюсный двигатель в области синхронной скорости имеет КПД, равный 0,8.

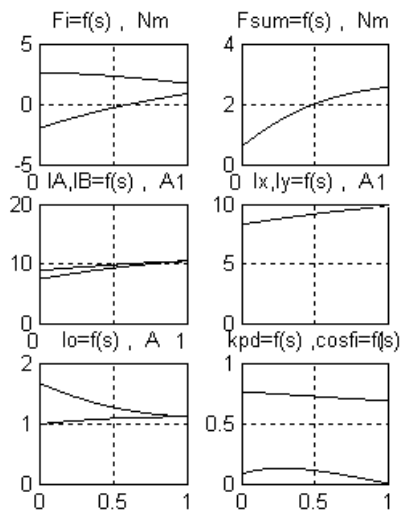


Рисунок 3 – Характеристики линейного асинхронного двигателя 2P=2

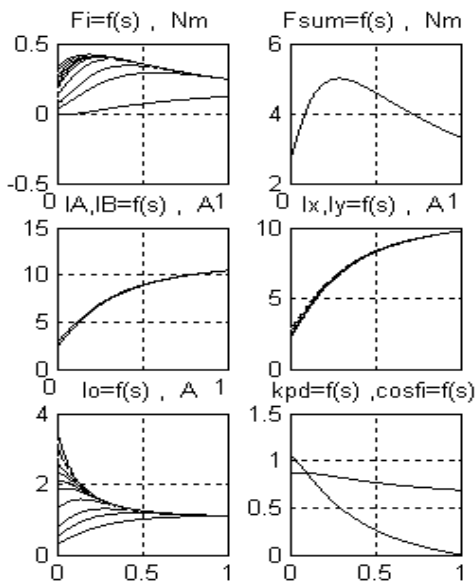


Рисунок 4 – Характеристики ЛАД 2P=14

На рис. 4 для сравнения приведены аналогичные характеристики 14-ти полюсного двигателя. Как видно при увеличении полюсов характеристики ЛАД приближаются к традиционному виду. Асимметрия фазных токов наблюдается только в около-синхронной скорости. Ток холостого хода равен примерно 25% от тока короткого замыкания. Двигатель имеет достаточно высокие КПД и коэффициент мощности.

Необходимо отметить, что увеличение тока холостого хода ни столько связано с увеличенным немагнитным зазором, сколько влиянием концевых эффектов, т.к. параметры ЛАД взяты с аналогичного асинхронного двигателя со стандартным воздушным зазором.

На рис. 5-7 показаны распределение тока намагничивания по длине индуктора при различных значениях скольжения $s=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$ для ЛАД с числом полюсов $2p=2, 6, 14$, где крутая линия соответствует режиму синхронной скорости $s=0$, самая низкая прямая линия – режиму короткого замыкания $s=0$.

Эти кривые выражают также характер распределения магнитной индукции по длине воздушного зазора. Как видно в режиме синхронной скорости ($s=0$) индукция на входе двигателя минимальна и имеет нарастающий характер по мере удаления от входа. При высоких значениях скольжения уменьшение индукции наблюдается только на входе двигателя, причем переходная зона уменьшается с увеличением числа полюсов. Асимметрия всех характеристик усугубляется с ростом скорости и уменьшением числа полюсов.

Аналогичная картина наблюдается для электромагнитных сил тяги элементарных двигателей.

На рис. 8 показано распределение электромагнитных сил тяги элементарных двигателей по длине индуктора при различных значениях скольжения. Из рисунка видно, что в режиме, близком к короткому замыканию все элементарные двигатели развивают одинаковую силу, а с ростом скорости это равенство нарушается и при синхронной скорости сила тяги имеет нарастающий характер от входа к выходу индуктора.

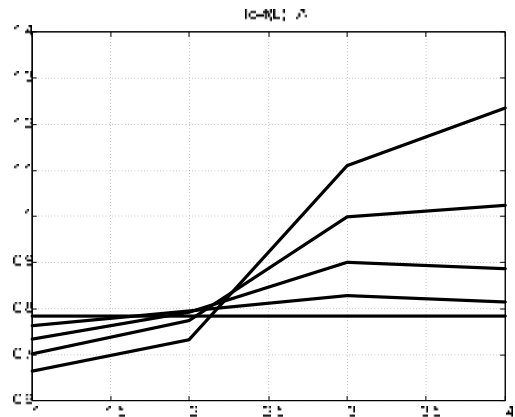


Рисунок 5 – Распределение тока намагничивания по длине индуктора 2p=2

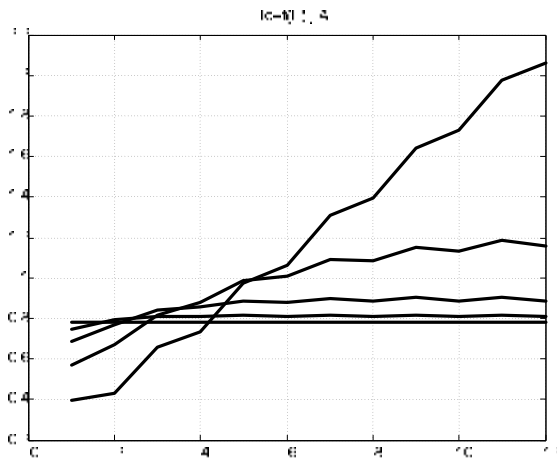


Рисунок 6 – Распределение тока намагничивания по длине индуктора при $2p=6$

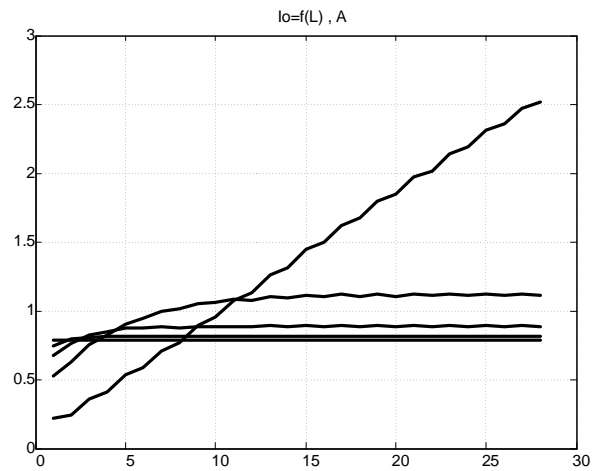


Рисунок 7 – Распределение тока намагничивания по длине индуктора $2p=14$

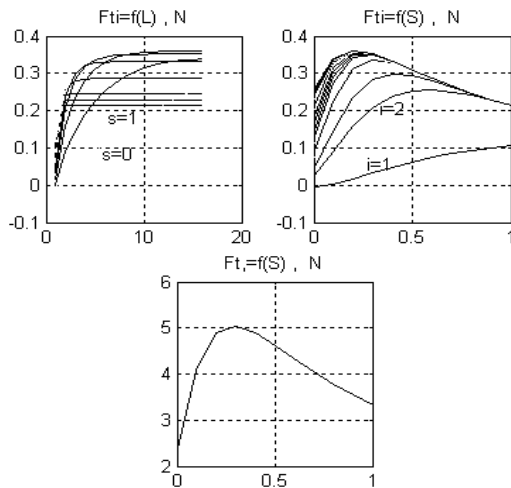


Рисунок 8 – Зависимости электромагнитных сил тяги элементарных двигателей от длины индуктора и скольжения

Наличие параллельных обмоток вторичного элемента, к чему могут быть приведены короткозамкнутый или массивный вторичный элемент, является наименее благоприятным с точки зрения протекания концевых эффектов.

Выводы.

1. Разработана математическая модель расчета динамических и статических режимов двухфазных линейных асинхронных двигателей с последовательной обмоткой индуктора и параллельной обмоткой вторичного элемента.
2. Наличие параллельной обмотки на вторичном элементе усугубляет асимметрию фазных токов, неравномерного распределения электромагнитных сил и магнитной индукции по длине воздушного зазора ЛАД.
3. Асимметрия усиливается с увеличением скорости и уменьшением числа полюсов.
4. Из-за наличия концевых эффектов двухфазный двухполюсный двигатель практически не является работоспособным.
5. Влияние концевых эффектов уменьшается с увеличением числа полюсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Набиев Ф.М. Электрические машины. Учеб. пособие для студентов ВУЗов. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. – 292 с.
2. Набиев Ф.М. Линейные асинхронные двигатели и их математическое моделирование // Научные труды АзНИИТИ №2. – Баку, 1996. – С. 3-24.

Стаття надійшла 10.04.2008 р.