

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА КОРОТКОЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Фёдоров М.М., Денник В.Ф.

Донецкий Национальный Технический Университет

Вареник Е.А.

УкрНИИВЭ

[fedorov@skif.net](mailto:fedorov@skif.net)

The dependencies of impedances as one-sheeted as multi-sheeted winding bars of squirrel-cage rotor of asynchronous motors by different factors are investigated in the work. The possibility of improvement torque-speed curves of asynchronous motor is revealed by means of using two-sheeted winding bars of the rotor winding.

В короткозамкнутых (КЗ) асинхронных двигателях (АД), особенно с двойной клеткой и глубокими пазами вытеснение тока в стержнях обмотки ротора при пуске приводит к существенному изменению активного и индуктивного сопротивлений проводника, расположенного в пазу ротора. При проектировании КЗАД это явление используется для улучшения их пусковых характеристик, а конкретнее для увеличения пускового момента при одновременном снижении пускового тока по сравнению с обычными КЗАД. Улучшение пусковых характеристик особенно важно для двигателей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (приводы угольных комбайнов и конвейеров, двигатели, питающиеся от маломощной сети и т.п.). В [1] показано, что при неизменном моменте сопротивления АД ( $M_c = \text{const}$ ) для плавного пуска двигателя с постоянным ускорением необходимо поддерживать постоянным момент на его валу в течение всего пуска и для достижения этого сопротивление его роторной цепи должно находиться в прямо пропорциональной зависимости от скольжения  $s$ . При этом токи статора и ротора получаются неизменными в течении пуска и их величина, а также величина пускового момента зависят от отношения активного сопротивления роторной цепи при пуске к его же значению при номинальном скольжении. Так для получения кратности пускового момента 2.5 и кратности пускового тока статора 2.95 указанное отношение должно равняться 13.3. В серийно выпускаемых АД это пока не реализовано и основной причиной этого является недостаточная информация о функциональной зависимости от скольжения  $s$  сопротивлений обмотки ротора  $r_2(s)$  и  $x_2(s)$  от различных факторов (форма и глубина паза, структура и удельная проводимость материала стержня и др.). В данной работе поставлена цель расширить информацию об указанной функциональной зависимости для чего произведено аналитическое исследование.

В основу предпринятого исследования положено использование теории переменного электромагнитного поля [2], при этом приняты следующие допущения: паз имеет прямоугольную форму; электромагнитная волна, проникающая в паз, является плоской; магнитная проницаемость проводника обмотки ротора неизмеримо мала по сравнению с магнитной проницаемостью среды, окружающей проводник паза.

Используя полученные допущения, была получена система уравнений, позволяющих получить зависимости активного  $r_2(s)$  и реактивного  $x_2(s)$  сопротивлений многослойного стержня обмотки КЗ ротора с изменяющимся значением удельной проводимости слоев в функции скольжения  $s$ . На первом этапе произведены исследования для случая, когда стержень в пазу ротора выполнен из однородного материала. Ниже приводятся некоторые результаты исследования. На рис. 1 приведены зависимости  $Kr$ , представляющего собой отношение активного сопротивления стержня при пуске к его сопротивлению постоянному току, от удельной проводимости материала стержня  $\gamma$  при различных глубинах паза:  $h=1$  см,  $h=3$  см и  $h=6$  см.

Из рис. 1 следует, что влияние материала стержня на величину его относительного пускового активного сопротивления  $Kr$  является существенным, особенно при увеличении глубины паза  $h$ . Так при  $h=6$  см и изменении удельной проводимости материала стержня с  $\gamma=1 \cdot 10^7$  См/м (немагнитная сталь) до  $\gamma=5.7 \cdot 10^7$  См/м (медь)  $Kr$  возрастает с 2.66 до 6.36, при  $h=3$  см – с 1.25 до 3.19, а при  $h=1$  см возрастание  $Kr$  незначительно (с 1 до 1.11).

На рис. 2 приведены зависимости  $Kr$  в функции глубины паза для стержней, выполненных из материалов с различной удельной проводимостью:  $\gamma_1=1.65 \cdot 10^7$  См/м (латунь),  $\gamma_2=3.7 \cdot 10^7$  См/м (алюминий) и  $\gamma_3=5.7 \cdot 10^7$  См/м (медь). При этом глубина паза изменялась от 10 до 50 мм. Следует отметить, что величина  $Kr$  для стержней из всех указанных материалов при  $h=1$  см близка к единице. Наибольшее изменение  $Kr$  имеет место для медных стержней (в 9.58 раз), для алюминиевых – в 8.17 раз, а для латунных – в 5.65 раза.

Важную роль при анализе пусковых характеристик АД имеют зависимости  $Kr(s)$ , в функции скольжения  $s$ , где  $Kr(s)$  – это отношение активного сопротивления стержня при текущем значении  $s$  к его сопротивлению постоянному току. На рис. 3 приведены зависимости  $Kr(s)$  в функции  $s$  для стержней, выполненных из тех же материалов ( $\gamma_1, \gamma_2$  и  $\gamma_3$ ), при глубине паза  $h=50$  мм. Из кривых рис. 3 видно, что только при  $\gamma=\gamma_1$  (латунь) зависимость  $Kr(s)=f(s)$  близка к прямолинейной. Кроме того при глубине паза  $h=50$  мм наибольшее значение  $Kr$  при  $s=1$  даже при  $\gamma=\gamma_3$  (медь) составляет 5.3, что не позволяет существенно улучшить пусковые

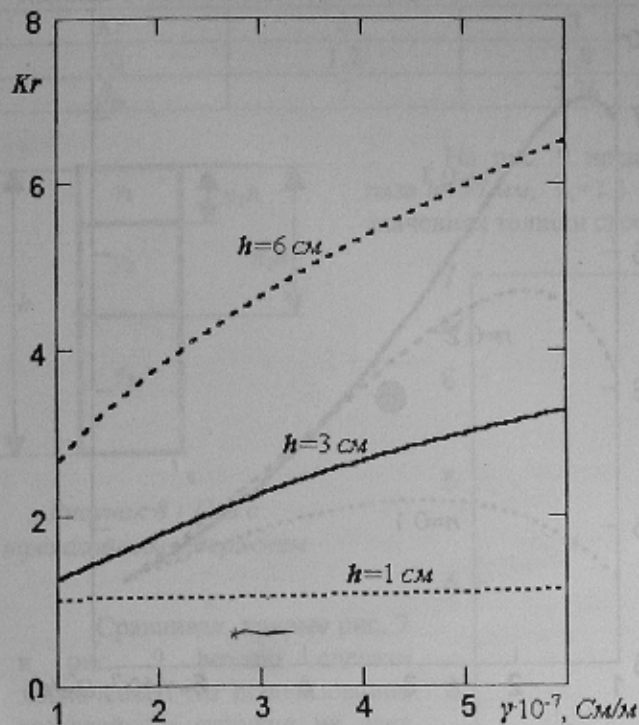


Рисунок 1 - Зависимости  $Kr(\gamma)$

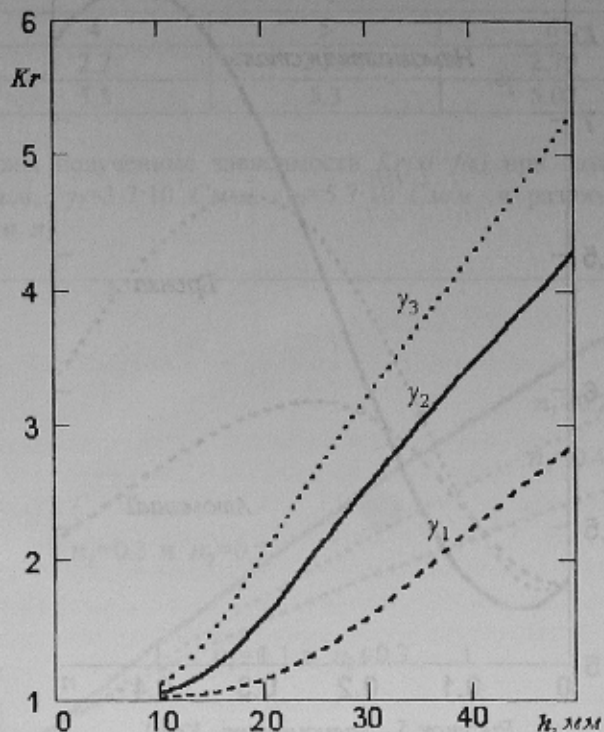


Рисунок 2 - Зависимости  $Kr(h)$

характеристики АД. В связи с этим были проведены исследования зависимостей от различных факторов сопротивлений стержней с многослойной структурой.

Ниже приведены некоторые результаты исследований для стержней из двух слоёв (рис. 4).

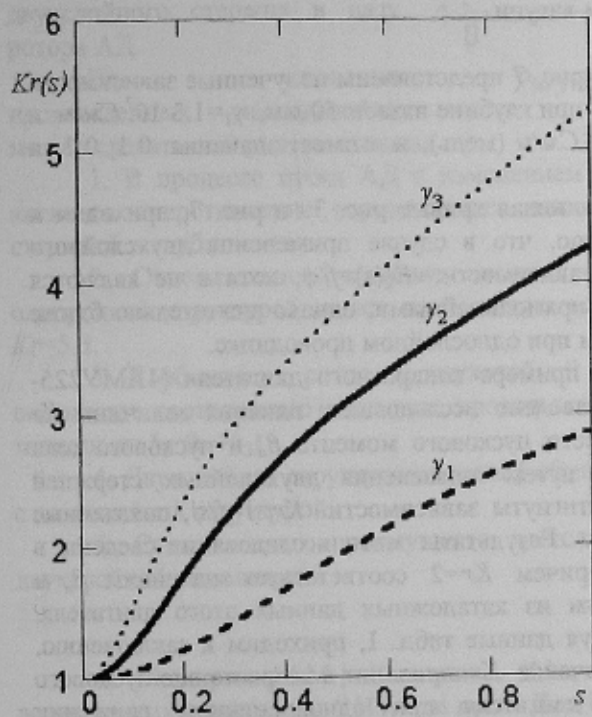


Рисунок 3 - Зависимость  $Kr(s)$  в функции  $s$

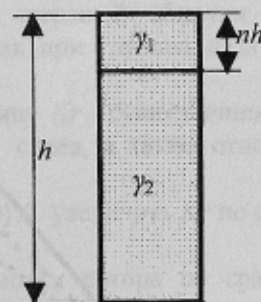


Рисунок 4 - Паз с двухслойным стержнем

В этом случае в первую очередь анализировалась зависимость относительного сопротивления проводника от соотношения между толщинами его слоёв. Так на рис. 5 приведена зависимость  $Kr$  в функции  $n$  (см. рис. 4) при глубине паза  $h=50$  мм и  $\gamma_2=5.7 \cdot 10^7$  См/м (медь), а  $\gamma_1$  имеет такие значения:  $1 \cdot 10^7$  См/м (немагнитная сталь);  $2.2 \cdot 10^7$  См/м (бронза) и  $3.7 \cdot 10^7$  См/м (алюминий). Из кривых рис. 5 следует, что указанная зависимость имеет как минимум, так и максимум, причем кратность пускового сопротивления в сильной степени зависит от соотношения между  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Наличие минимума кривой  $Kr(n)$  объясняется тем, что при малых значениях  $n$  сопротивление стержня постоянному току растет интенсивнее, чем переменному. В указанных условиях максимальная величина  $Kr=7.5$  имеет место при  $n=0.43$  и  $\gamma_1=1 \cdot 10^7$  См/м. Отметим, что если бы проводник имел проводимость  $\gamma_2$  по всей глубине паза, то  $Kr$  равнялась бы 5.3 (см. рис. 2).



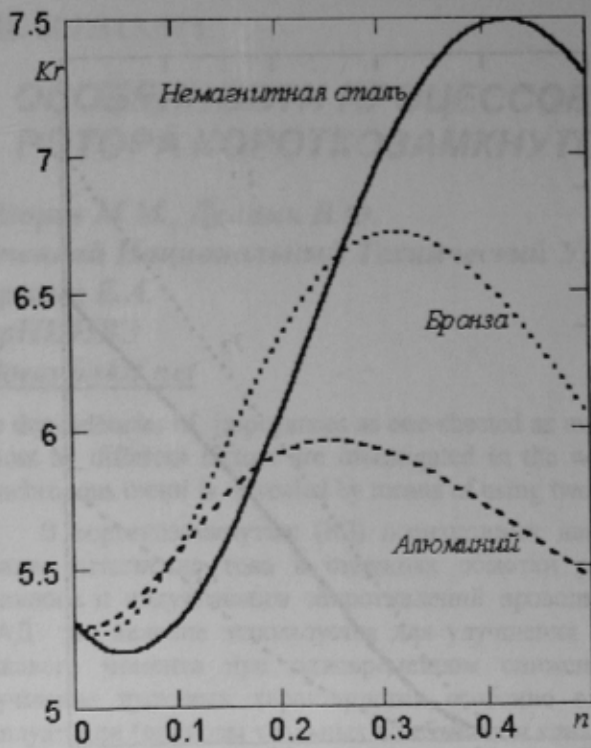


Рисунок 5 - Зависимость  $Kr(n)$

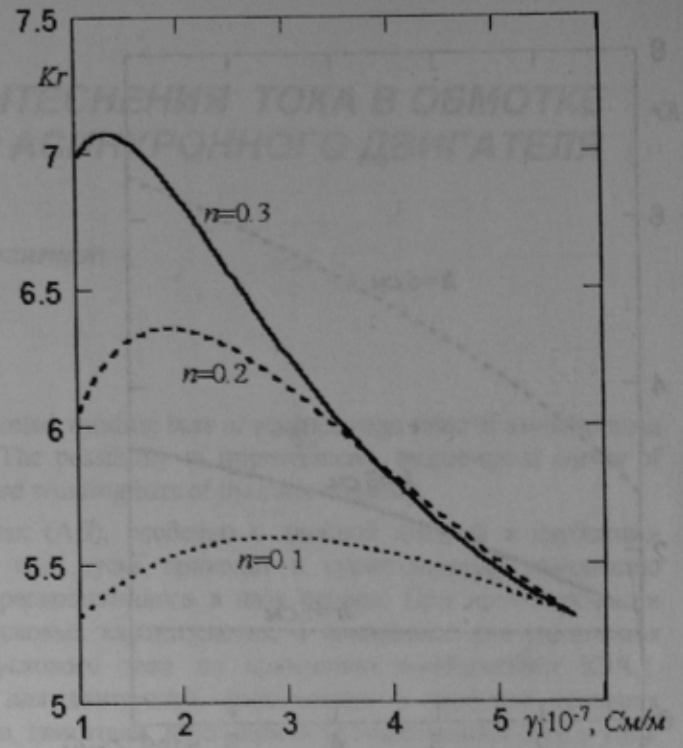


Рисунок 6 - Зависимость  $Kr(\gamma_1)$

Исследована также зависимость  $Kr$  от удельной проводимости верхнего слоя. Так на рис. 6 приведена зависимость  $Kr(\gamma_1)$  при глубине паза  $h=50$  мм и  $\gamma_2=5.7 \cdot 10^7$  См/м (медь), а  $n$  имеет значения: 0.1; 0.2 и 0.3. Из кривых рис.6 видно, что в указанных условиях максимальное значение  $Kr=7.07$  имеет место при  $n=0.3$  и  $\gamma_1=1.3 \cdot 10^7$  См/м. Это значение  $\gamma_1$  соответствует некоторым сортам латуни.

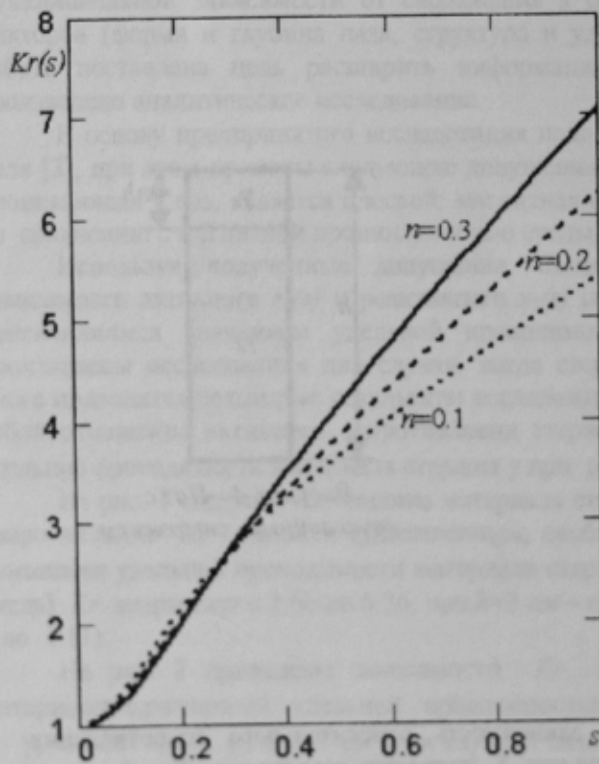


Рисунок 7 - Зависимости  $Kr(s)=f(s)$  для двухслойного стержня

На рис. 7 представлены полученные зависимости  $Kr(s)=f(s)$  при глубине паза  $h=50$  мм,  $\gamma_1=1.3 \cdot 10^7$  См/м и  $\gamma_2=5.7 \cdot 10^7$  См/м (медь), а  $n$  имеет значения: 0.1; 0.2 и 0.3.

Сравнивая кривые рис. 3 и рис. 7, приходим к заключению, что в случае применения двухслойного стержня зависимости  $R_2(s)=f(s)$ , хотя и не являются идеально прямолинейными, однако значительно ближе к ним, чем при однослойном проводнике.

На примере конкретного двигателя (4АМУ225-4М) произведено исследование влияния величины  $Kr$  на кратности пускового момента  $\beta_n$  и пускового тока  $\beta_{In}$ , если путем применения двухслойных стержней будут достигнуты зависимости  $Kr(s)=f(s)$ , показанные на рис. 7. Результаты этого исследования сведены в табл. 1, причем  $Kr=2$  соответствует значениям  $\beta_n$  и  $\beta_{In}$ , взятым из каталожных данных этого двигателя. Анализируя данные табл. 1, приходим к заключению, что увеличение  $Kr$  приводит к возрастанию пускового момента двигателя при одновременном снижении пускового тока. Однако при использовании материалов стержней обмотки ротора, о которых шла речь в данной работе, реально достижимые значения  $Kr$  не превышают шести. Это позволяет снизить пусковой ток примерно на 30% по сравнению с его каталожным значением.

Произведено также исследование зависимости сопротивлений трехслойного проводника (рис.8) от различных факторов. Ниже приведены некоторые результаты этого исследования.

Таблица 1 - Зависимость  $\beta_n$  и  $\beta_{In}$  от  $Kr$

$Kr$	2	3	4	5	6
$\beta_n$	1.2	1.8	2.2	2.55	2.79
$\beta_{In}$	7	5.76	5.5	5.3	5.07

На рис. 9 представлены полученные зависимости  $Kr(s)=f(s)$  при глубине паза  $h=50$  мм,  $\gamma_1=1.3 \cdot 10^7$  См/м,  $\gamma_2=3.7 \cdot 10^7$  См/м,  $\gamma_3=5.7 \cdot 10^7$  См/м и различных значениях толщин слоев  $n_1$  и  $n_2$ .

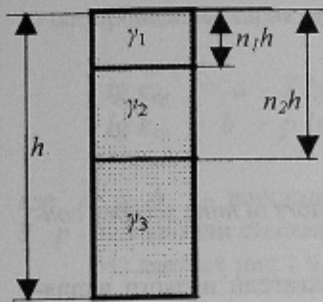


Рисунок 8 - Паз с трехслойным стержнем

Сравнивая кривые рис. 7 и рис. 9 можно сделать заключение, что использование трёхслойного стержня не даст увеличения  $Kr$  и не приближает зависимость  $Kr(s)=f(s)$  к прямолинейной по сравнению со случаем использования двухслойного стержня в пазу ротора АД.

На основании произведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В процессе пуска АД с изменением частоты тока в однородном стержне обмотки ротора на её активное сопротивление определяющее влияние оказывают величины удельной проводимости материала стержней и глубина паза.
2. Относительное значение пускового активного сопротивления  $Kr$  стержней обмотки ротора с однородной структурой имеет наибольшую величину у медных стержней. Так при глубине паза  $h=50$  мм  $Kr=5.3$ .
3. В обмотках ротора с двухслойной структурой стержней на величину  $Kr$  существенное влияние оказывают соотношение удельных проводимостей верхнего  $\gamma_1$  и нижнего  $\gamma_2$  слоёв, а также отношение их толщин  $n = h_1/(h_1+h_2)$ .
4. Двухслойная структура стержней обмотки ротора позволяет на (30-50)% увеличить  $Kr$  по сравнению с однослойной структурой.
5. Существенных преимуществ трёхслойной структуры стержней обмотки ротора по сравнению с двухслойной не выявлено.

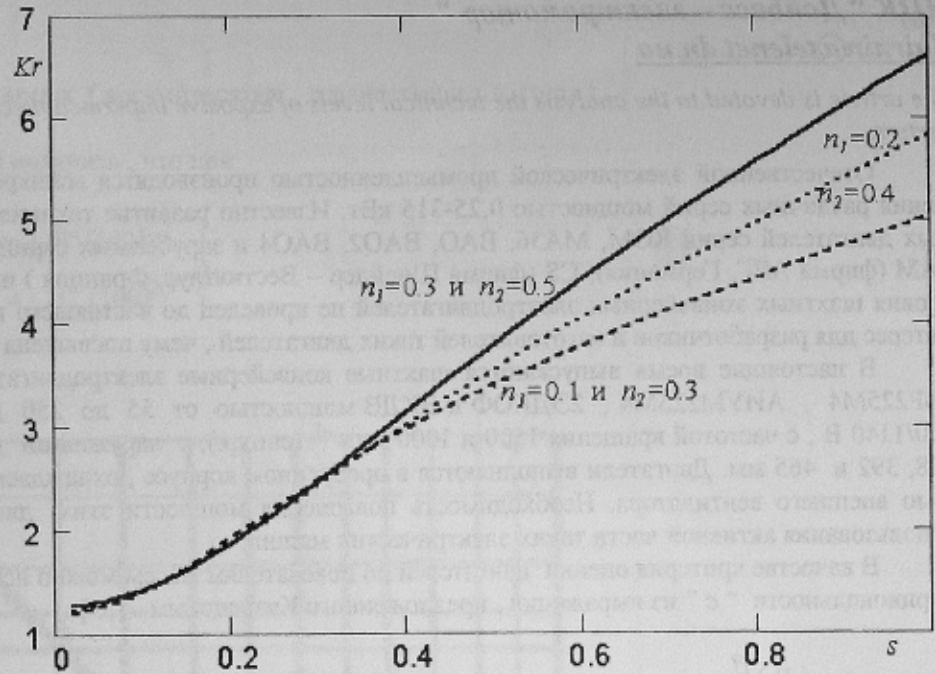


Рисунок 9 - Зависимости  $Kr(s)=f(s)$  для трехслойных стержней

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров М.М., Василенко Д.В., Вареник Е.А. Совершенствование пусковых характеристик асинхронных двигателей. // Наукові праці ДонНТУ - Електротехніка і енергетика - 2004 - випуск 79.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М., ВШ, 1988.