

ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ТОКОВ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ РОТОРА

В.Б. Финкельштейн¹, докт.техн.наук, Д.Н. Калужный¹, канд.техн.наук, Ю.В. Ковалева¹, канд. техн.наук, А.Н. Гетья²

¹- Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина, email: finalvb@gmail.com,

²- ООО СКБ УКРЭЛЕКТРОМАШ,
ул. Искринская, 37, Харьков, 61005, e-mail: andynikan@gmail.com

Разработана методика расчета проектируемых асинхронных двигателей со скосом пазов с заданной величиной сопротивления изоляции клетки ротора. Линия с распределенными параметрами, являющаяся моделью ротора при наличии поперечных токов, заменена 70 элементарными контурами. Теоретически и экспериментально установлено, что поперечные токи значительно увеличивают моменты двигателя. Получены зависимости кратности моментов двигателя от величины удельного сопротивления изоляции клетки ротора. Экспериментально установлено, что при нагревании ротора токами в клетке при температуре порядка 250÷300°C происходит скачок сопротивления изоляции стержней, приводящий к увеличению тока и момента.

Библ. 7, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: сопротивление изоляции клетки ротора, скачок сопротивления, поперечные токи, скос пазов, линия с распределенными параметрами.

Существование поперечных токов в асинхронных двигателях известно, главным образом, в связи с дополнительными потерями и их влиянием на КПД двигателя [1]. Сравнительно недавно [2, 3] обратили внимание на то, что поперечные токи оказывают существенное влияние на характеристики асинхронных машин. В двухскоростных двигателях лифта с неизолированными стержнями ротора они могут вызвать изменение тормозного момента на 100% и более [2]. Пренебрежение изменением намагничивающего тока и распределением ЭДС по длине двигателя при определении поперечного тока [2, 3] снижают точность результатов исследований, проведенных на математических моделях. С использованием уравнения линии с распределенными параметрами в [1] описаны токи в роторе в предположении нулевого сопротивления короткозамыкающих колец при насыщенном магнитопроводе. Однако расчёты потерь от поперечных токов, выполненные в соответствии с работой [2], дают существенное расхождение с экспериментом. Поэтому при проектировании асинхронных двигателей необходимы методика и программа расчёта, которые адекватно отражают всю совокупность процессов в них во взаимосвязи с поперечными токами.

Установлено [1, 2], что пусковой момент может быть увеличен до 200% в машине с неизолированной клеткой по сравнению с такой же машиной с изолированной клеткой. Т.к. увеличение момента связано с поперечными токами, а они обусловлены переходным сопротивлением, то необходимо исследовать зависимость моментов от величины переходного сопротивления.

Цель работы. Разработка необходимой для расчета характеристик двигателей методики, учитывающей поперечные токи, и экспериментально-аналитическое исследование степени увеличения пускового, минимального и максимального моментов асинхронных двигателей со скосом пазов при уменьшении сопротивления изоляции клетки ротора, в том числе и за счет термического воздействия на ротор, для повышения технического уровня выпускающихся и проектируемых двигателей.

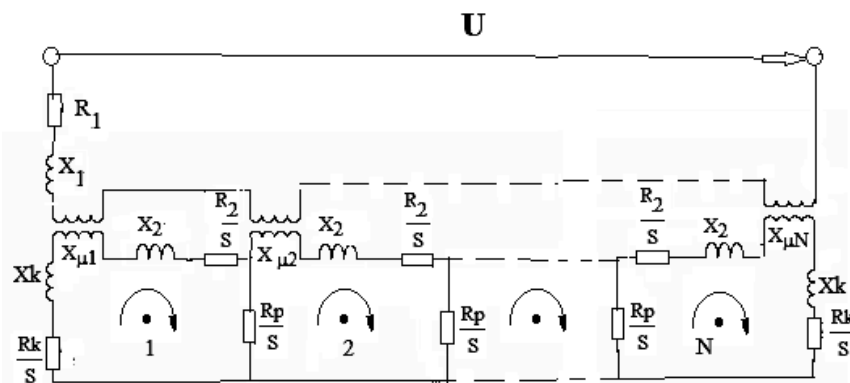


Рис. 1

На рис. 1 показана предлагаемая схема замещения асинхронного двигателя с учетом поперечных токов. Намагничивающая и роторная ветви представляют собой линию с распределёнными параметрами, которая состоит из N элементарных контуров. В проведенных расчетах $N=70$. Также условно двигатель по длине разделен на N равных частей, каждая из которых названа авторами *элементарным двигателем*, а пакет сердечника элементарного двигателя – *элементарным пакетом*. Участок, занятый элементарным пакетом, назван далее *элементарным участком*. На рис. 1 обозначены: R_2, X_2, X_μ и R_p – сопротивления элементарной ячейки ротора; R_k, X_k – активное и реактивное сопротивления короткозамыкающих колец; R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; S – скольжение.

Сопротивление изоляции клетки ротора учитывается удельным R_{pu} ($\text{Ом}\cdot\text{см}^2$): сопротивлением площадки изоляции площадью 1 см^2 . Это даёт возможность рассчитывать сопротивление изоляции стержней любой конфигурации. Ранее в расчётах в качестве единицы сопротивления изоляции принималось сопротивление между стержнем единичной длины с заданной конфигурацией его поперечного сечения ($\text{Ом}\cdot\text{см}^2$) и сердечником ротора [1]. Это не давало возможности использовать полученные значения для расчета сопротивления изоляции роторов различных машин, т.к. конфигурация сечения стержня не приводилась.

Приведенное сопротивление изоляции ротора может быть определено по предлагаемой формуле

$$R_p = R_{pu} \cdot \frac{12 \cdot W_f^2 \cdot N}{Z_2 \cdot \Pi \cdot l_c}, \quad (1)$$

где W_f – эффективное число витков обмотки статора, Z_2 – число пазов ротора, Π – периметр поперечного сечения паза ротора, l_c – длина сердечника.

В [1, 4, 5] рассматривались токи между соседними стержнями ротора. В [5] считалось, что поперечные токи протекают от стержня ротора к его сердечнику, беличья клетка приводится к трём стержням (фазам), к каждому из которых подсоединена намагничивающая ветвь, а к последней также подсоединены активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Такой подход позволил авторам рассматривать совместно и статор, и ротор, а также учесть:

- конечное сопротивление короткозамыкающих колец (ранее сопротивление колец принималось равным нулю, что приводило к погрешности порядка 18% [1]);
- реальное изменение величины и фазы ЭДС на элементарных участках по длине стержня при наличии скоса пазов с учётом нелинейности магнитопровода (ранее получено решение для двигателя без скоса пазов при неизменной по длине ЭДС элементарных пакетов с фазой, изменяющейся линейно с углом скоса, что не соответствует действительности [1]);
- влияние на ток, моменты и потери двигателя изменения величины переходного сопротивления между стержнем и сердечником ротора (ранее этот вопрос аналитически не описан в [1]);
- увеличение потерь в стали под нагрузкой.

В соответствии со схемой замещения (рис. 1) по методу контурных токов составлена система уравнений и определены токи во всех ветвях.

Для двигателя со скосом пазов намагничивающий ток ротора с учётом того, что по длине сердечника изменяется пространственный угол между токами статора и ротора, может быть представлен

в виде

$$\underline{I}_{\mu 2} = \underline{I}'_2 + \underline{I}_1 \cdot e^{i\alpha \frac{l}{l_c}}, \quad (2)$$

где α – угол скоса пазов ротора в электрических радианах, l – текущее значение длины, \underline{I}'_2 – комплекс приведенного тока ротора; \underline{I}_1 – комплекс тока статора.

Аналогично для намагничивающего тока статора можно записать

$$\underline{I}_{\mu 1} = \underline{I}'_2 \cdot e^{-i\alpha \frac{l}{l_c}} + \underline{I}_1, \quad \text{причем} \quad \left| \underline{I}_{\mu 1} \right| = \left| \underline{I}_{\mu 2} \right|. \quad (3)$$

Если скос пазов отсутствует ($\alpha = 0$), то по всей длине двигателя намагничивающий ток одинаковый, и выражение для намагничивающего тока $\underline{I}_\mu = \underline{I}_{\mu 1} = \underline{I}_{\mu 2} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$ становится традиционным. Но для двигателей со скосом пазов оно не отражает реальный характер распределения намагничивающего тока по контуру проводников статора и ротора и по элементарным пакетам. Для таких двигателей намагничивающий ток вдоль длины пакета сердечника изменяется по модулю и по фазе.

Для ячейки ротора бесконечно малой длины dl можно записать уравнения

$$-\frac{\partial \underline{u}}{\partial l} = \frac{R_{2e}}{S} \underline{I}'_2 + iX_{2e} \underline{I}'_2 + iX_{\mu e} (|I_{\mu 2}|) \cdot \underline{I}_{\mu 2}; \quad -\frac{\partial \underline{I}'_2}{\partial l} = \frac{\underline{u}}{R_{pe} / S}, \quad (4)$$

где R_{2e} , X_{2e} , $X_{\mu e}$ и R_{pe} – активное, индуктивное рассеяния, индуктивное намагничивающей ветви и поперечное соответственно сопротивления ротора приведенные к единичной длине; \underline{I}'_2 и \underline{u} – комплексные функции тока и напряжения от осевой координаты.

Так как в выражение для намагничивающего тока входит ток статора, то систему (4) следует дополнить уравнением

$$\underline{U} = (R_1 + i \cdot X_1) \cdot \underline{I}_1 + i \cdot \frac{1}{l_c} \int_{-l/2}^{l/2} X_{\mu} (|I_{\mu 1}|) \cdot (I_{\mu 1}) \cdot dl. \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений (в комплексах) (4) совместно с уравнением (5) является нелинейной, т.к. зависимость $X_{\mu}(I_{\mu})$ – нелинейна. Следовательно, получить решение в замкнутом виде не представляется возможным. Возможно получение решения при разбиении двигателя на N конечных частей (рис. 1). Применяя метод контурных токов для n -ой ячейки ($n = 2, 3 \dots N-1$), можно записать

$$\underline{I}_{2n} \cdot (2 \frac{R_p}{S} + iX_2 + \frac{R_2}{S}) - (\underline{I}_{2n-1} + \underline{I}_{2n+1}) \cdot \frac{R_p}{S} = iX_{\mu} (|I_{\mu 2n}|) \cdot (\underline{I}_{2n} + \underline{I}_1 \cdot e^{i\alpha \frac{l_2 n}{l_c}}). \quad (6)$$

Здесь и далее первый индекс 2 при токах указывает на принадлежность к ротору, а второй n , $n-1$, $n+1$, N , $N-1$ либо цифра – номер ячейки. Уравнений вида (6) будет на два меньше числа разбиений N .

Для первой и N -й ячеек уравнения примут вид

$$\underline{I}_{21} \cdot (\frac{Rk}{S} + iX_2 + \frac{R_2}{S}) - \underline{I}_{22} \cdot \frac{R_p}{S} = iX_{\mu} (|I_{\mu 21}|) \cdot (\underline{I}_{21} + \underline{I}_1 \cdot e^{i\alpha \frac{l_2 n}{l_c}}), \quad (7)$$

$$\underline{I}_{2N} \cdot (\frac{Rk}{S} + iX_2 + \frac{R_2}{S}) - \underline{I}_{2N-1} \cdot \frac{R_p}{S} = iX_{\mu} (|I_{\mu 2N}|) \cdot (\underline{I}_{2N} + \underline{I}_1 \cdot e^{i\alpha \frac{l_2 N}{l_c}}). \quad (8)$$

Уравнение для статора

$$\underline{U} = (R_1 + iX_1) \cdot \underline{I}_1 + i \cdot \sum_{n=1}^N X_{\mu n} (|I_{\mu 1n}|) \cdot (\underline{I}_{2n} \cdot e^{-i\alpha \frac{l_2 n}{l_c}} + \underline{I}_1). \quad (9)$$

Система алгебраических уравнений (6) – (9) нелинейная из-за нелинейной зависимости $X_{\mu}(I_{\mu})$. Для её решения рассчитывается на холостом ходу и аппроксимируется зависимость $E(I_{\mu})$. Затем по существующей методике расчета [6] (без учёта поперечных токов) рассчитываются номинальный режим, пусковой режим, режим минимального момента и режим максимального момента и при известных комплексах токов статора и ротора в каждом режиме для n -ой ячейки определяется модуль намагничивающего тока, а затем индуктивное сопротивление намагничивающей ветви

$$X_{\mu n} = E(I_{\mu n}) / (I_{\mu n} \cdot N). \quad (10)$$

На рис. 2 показаны зависимости этого параметра от текущей длины сердечника в долях от его полной длины: сплошная кривая – для номинального режима, а штриховая – для режимов пускового, минимального и максимального моментов. Эти зависимости получены для двигателя мощностью 30 кВт, данные которого будут приведены ниже. В процессе расчета по программе и методике, учитывающей поперечные токи [7], индуктивные сопротивления намагничивающих ветвей элементарных двигателей изменяются. Если в нелинейной системе уравнений (6)–(9) вместо функции $X_{\mu n}(I_{\mu n})$ подставить её значение (10), то система линеаризуется. В Matcad 2001 PRO имеется возможность

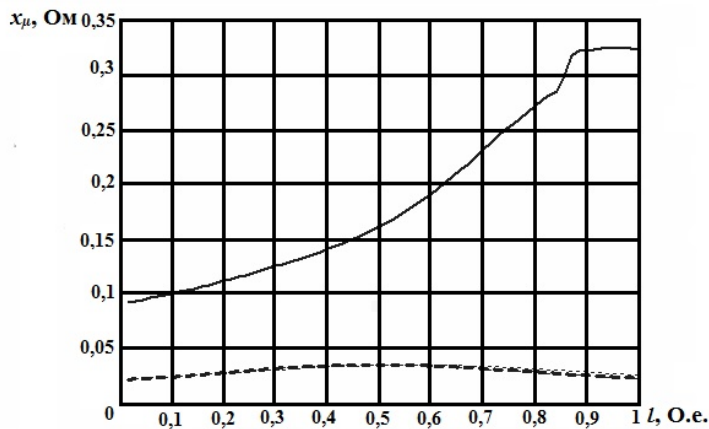


Рис. 2

двигателей изменяются. Если в нелинейной системе уравнений (6)–(9) вместо функции $X_{\mu n}(I_{\mu n})$ подставить её значение (10), то система линеаризуется. В Matcad 2001 PRO имеется возможность

решения таких систем $N+1$ линейных алгебраических комплексных уравнений. Практически достаточная точность решения получается при разбиении двигателя на сорок частей ($N=40$). При разбиении свыше сорока изменения происходят в третьем десятичном знаке, но для обеспечения надежности результата все вычисления проводились при разбиении двигателя на 70 частей. Корни системы уравнений (6) – (9) – это все контурные токи и ток статора. При известных токах статора и в клетке ротора представляется возможным определить электромагнитную мощность от токов в клетке, поперечные токи, электромагнитную мощность от поперечных токов, момент, коэффициент мощности, потребляемую мощность, КПД, потери в клетке ротора, потери от поперечных токов и потери в обмотке статора

$$P_{\text{эр}} = m \cdot \left[\sum_{n=2}^{N+1} I_{2n}^2 \cdot \frac{R_2}{S} + \frac{Rk \cdot (I_{2N+1}^2 + I_{2_2}^2)}{S \cdot 2} \right], \quad (11)$$

$$\frac{I_{p_n}}{I_{2_{n+1}}} = \frac{I_{2_{n+1}}}{I_{2_n}}, \quad P_{\text{эп}} = m \cdot \sum_{n=2}^N I_{p_n}^2 \cdot \frac{R_p}{S}, \quad (12, 13)$$

$$M = (P_{\text{эр}} + P_{\text{эп}}) \cdot p / 2\pi f, \quad \cos \varphi = \cos(\arg(I_1)), \quad (14, 15)$$

$$P_1 = m \cdot U \cdot \operatorname{Re}(I_1), \quad (16)$$

$$\eta = P_2 / P_1, \quad P_{\text{кл}} = P_{\text{эр}} \cdot S, \quad P_{\text{кв}} = P_{\text{эр}} \cdot S, \quad P_{\text{св}} = m I_1^2 R_1. \quad (17, 18, 19, 20)$$

При известных контурных токах поперечные токи вычисляются по (12). Механические потери задаются на основании результатов испытаний аналогичных машин. Добавочные потери принимаются равными 0,5 % от потребляемой мощности.

Вычисление потерь в стали осуществляется с учетом неравномерности распределения ЭДС элементарных пакетов (рис. 3). Сплошная кривая относится к режиму короткого замыкания, пунктирная – к режиму минимального момента, штрихпунктирная – к режиму максимального момента и точечная – к номинальному режиму. Потери в стали могут быть определены по формуле

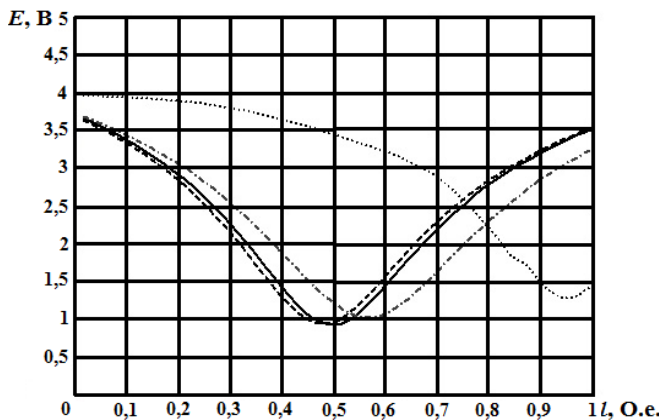


Рис. 3

$$P_{\text{Fe}} = \sum_{n=1}^N \frac{(X_{\mu n} \cdot I_{\mu n})^2}{R_{\text{Fe}}}, \quad (21)$$

где R_{Fe} – сопротивление, интерпретирующее потери в стали в элементарном пакете.

За счет неравномерности распределения индукции вдоль длины сердечника потери в стали увеличились на 14% относительно потерь, рассчитанных в предположении равномерного распределения индукции при неизменном магнитном потоке и составили 558 Вт для двигателя мощностью 30 кВт.

По описанной методике и разработанной компьютерной программе [7] были проведены расчетные исследования двигателя со следующими данными: мощность – 30 кВт, фазное напряжение – 220 В, синхронная частота вращения – 3000 об/мин, наружный и внутренний диаметры сердечника статора – 349 мм и – 180 мм, длина сердечника – 190 мм, величина воздушного зазора – 0,7 мм, число пазов статора – 36, число пазов ротора – 46, число проводников в пазу – 18, число параллельных ветвей – 2, число параллельных проводников – 5, шаг по пазам – 11, материал сердечника – сталь 2212, обмотка двухслойная, угол скоса пазов ротора – 5 пазных делений статора (50 электрических градусов), диаметр провода гол. – 1,4 мм, размеры короткозамыкающего кольца ротора 40×39 мм. Результаты расчета по существующей программе, по разработанной программе при величине удельного сопротивления изоляции ротора $R_{\text{пу}} = 0,22 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$; а также результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1, где в строках 1, 2, 3 представлены результаты расчетов по существующей, разработанной методикам и результаты испытаний; K_{In} , K_{Mn} , K_{min} , K_{max} – кратности пускового тока, пускового момента, минимального момента и максимального момента соответственно; $P_{\text{св}}$, P_{Fe} , $P_{\text{кл}}$, $P_{\text{р}}$, $P_{\text{доб}}$, $P_{\text{мех}}$ – потери в обмотке статора, сердечнике статора, в клетке ротора, от

поперечных токов, добавочные и механические соответственно. Экспериментально исследованы были два двигателя мощностью 30 кВт. В знаменателе дроби в таблице указан процент отклонения расчетной величины от полученной при экспериментальных исследованиях. Знак минус в ячейке таблицы указывает на то, что расчетная величина меньше опытной. За 100% принималось среднеарифметическое из двух опытных значений соответствующей величины.

Таблица 1

	$\frac{I, A}{\%}$	$\frac{\eta, \%}{\%}$	$\frac{\cos\varphi}{\%}$	$\frac{S\%}{\%}$	$\frac{K_{In}}{\%}$	$\frac{K_{Mn}}{\%}$	$\frac{K_{min}}{\%}$	$\frac{K_{max}}{\%}$	$\frac{P_{cu}}{\text{кВт}} \%$	$\frac{P_{Fe}}{\text{кВт}} \%$	$\frac{P_{кл}}{\text{кВт}} \%$	$\frac{P_p}{\text{Вт}} \%$	$\frac{P_{доб}}{\text{кВт}} \%$	$P_{мех}$ кВт
1	$\frac{61}{5,17}$	$\frac{90,8}{0,11}$	$\frac{0,815}{5,23}$	$\frac{1,5}{3,26}$	$\frac{4,8}{35,6}$	$\frac{0,42}{80}$	$\frac{0,11}{94,1}$	$\frac{2,1}{23,9}$	$\frac{1,09}{43,4}$	$\frac{0,46}{24,6}$	$\frac{0,48}{1,03}$	–	$\frac{0,16}{2,74}$	0,8
2	$\frac{57}{1,72}$	$\frac{91}{0,77}$	$\frac{0,881}{2,442}$	$\frac{1,6}{3,2}$	$\frac{7,9}{6,04}$	$\frac{2,16}{1,89}$	$\frac{1,74}{8,18}$	$\frac{2,54}{8,14}$	$\frac{0,93}{22,4}$	$\frac{0,56}{7,44}$	$\frac{0,52}{7,2}$	1,9	$\frac{0,16}{2,74}$	0,8
3	58	$\frac{90,6}{91,2}$	$\frac{0,86}{0,86}$	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{7,3}{7,6}$	$\frac{2,09}{2,15}$	$\frac{1,87}{1,92}$	$\frac{2,68}{2,85}$	$\frac{0,75}{0,77}$	$\frac{0,56}{0,65}$	$\frac{0,48}{0,49}$	–	$\frac{0,164}{0,165}$	$\frac{0,79}{0,9}$

Из таблицы видно, что результаты расчета по разработанной методике, особенно по кратности пускового тока и кратностям моментов, гораздо ближе к результатам экспериментальных исследований по сравнению с результатами расчета по существующей методике [6].

В номинальном режиме электромагнитная мощность, обусловленная поперечными токами, ничтожно мала и составляет всего 0,372 % от общей электромагнитной мощности, а потери от поперечных токов в этом режиме – всего 0,0059 % от потребляемой мощности. Но в остальных режимах она резко возрастает: в режиме короткого замыкания до 58,8 % от общей электромагнитной мощности, в режиме минимального момента – 46,6 %, в режиме максимального момента – 9,26 %. Такое увеличение электромагнитных мощностей и соответственно моментов двигателя в указанных режимах получено для конкретного двигателя, для других двигателей оно будет иным. Но обусловленное поперечными токами увеличение моментов остается неизменным для любых асинхронных двигателей с беличьей клеткой.

По разработанной методике рассчитаны зависимости кратностей моментов от величины удельного сопротивления изоляции клетки ротора (рис. 4). Сплошная кривая относится к кратности пускового момента, пунктирная – к кратности минимального момента, штрихпунктирная – к кратности максимального момента. Из графиков видно, что при уменьшении удельного сопротивления изоляции клетки ротора от 0,55 до 0,05 Ом·см² (в [1] указывается, что величина сопротивления изоляции клетки может разниться до трех порядков) кратность пускового момента увеличивается в 2,46 раза, минимального момента – в 6,33 раза и максимального момента – в 1,32 раза. Результаты,

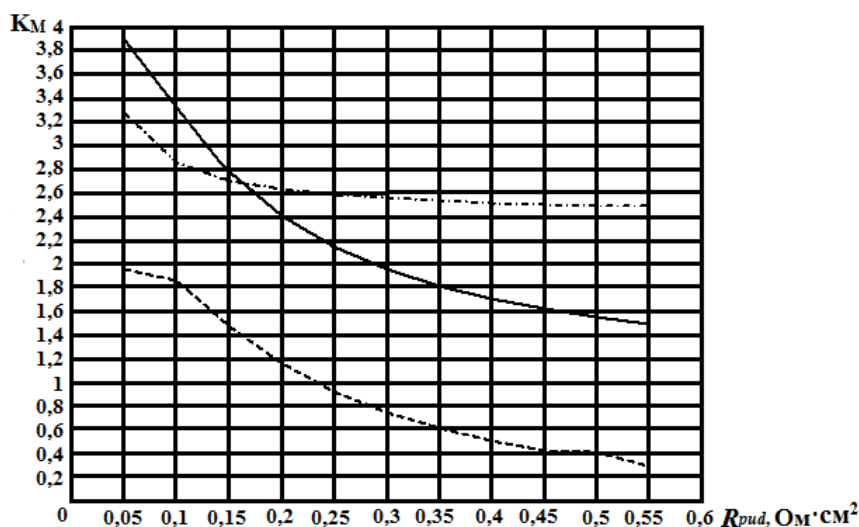


Рис. 4

полученные теоретически, согласуются с экспериментальными данными [2, 3].

В настоящее время технологические операции, условия эксплуатации и хранения, изменяющие сопротивление изоляции двигателей, обнаруживаются случайно. В [2] описано увеличение тормозного момента лифтовых двигателей после их длительного хранения на складе, там же описано термическое старение роторов. Обнаружено улучшение пускового момента после отжига роторов.

Возможно скачкообразное уменьшение сопротивления изоляции клетки ротора. Оно обусловлено различием коэффициентов теплового линейного расширения алюминия стержней ротора $\alpha = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и стали сердечника $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. При нагреве ротора с ростом температуры t увеличение размера паза в стальном сердечнике меньше, чем возможное увеличение алюминиевого стержня беличьей клетки ротора. При этом между стержнем и сердечником резко увеличивается давление, продавливается оксидная пленка на поверхности алюминиевого стержня и между стержнем и сердечником уменьшается удельное сопротивление изоляции R_{pi} , что приводит к мгновенному скачкообразному уменьшению сопротивления ротора в целом. Температура, при которой происходит скачок сопротивления, определена по цвету побежалости на поверхности ротора (серый), что, как известно, соответствует температуре нагревания $250 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}$. Уменьшение сопротивления изоляции ротора обуславливает рост тока и момента. Для качественной оценки влияния поперечных токов на моменты двигателя были проведены экспериментальные исследования со срезанными кольцами ротора. Двухполюсный двигатель был подключен к сети и находился в режиме короткого замыкания примерно под двойным номинальным током. Нагрев ротора происходил за счёт потерь в самом роторе. По истечении нескольких минут произошел указанный скачек, при этом ток удвоился, а момент увеличился в полтора раза.

Данные экспериментальных исследований и расчета приведены в табл. 2. Данные после отжига помечены буквой «О», а после скачка сопротивления – буквой «R». В числителе данные в указанных единицах измерения, а в знаменателе – в % от соответствующих величин двигателя в состоянии поставки (с короткозамыкающими кольцами до отжига и скачка сопротивления).

В настоящее время отсутствует технология воздействия на ротор, позволяющая получать стабильное значение сопротивления изоляции ротора требующейся величины. В процессе серийного производства двигателей отжиг можно совместить с выполняемым при изготовлении нагревом в печи залитых пакетов роторов перед запрессовкой в них валов. Необходимо только поднять температуру в печи до $520 \text{ } ^\circ\text{C}$, что обеспечивается регуляторами режима печи.

Таблица 2

Тип АД	Ротор в исходном состоянии (при поставке)			Ротор со срезанными короткозамыкающими кольцами						Примечания
				до отжига, нагревания или скачка сопротивления			после отжига или скачка сопротивления			
	$I_k, \text{А}$	$P_k, \text{кВт}$	$M_{п}, \text{Нм}$	$\frac{I_k, \text{А}}{\%}$	$\frac{P_k, \text{кВт}}{\%}$	$\frac{M_{п}, \text{Нм}}{\%}$	$\frac{I_k, \text{А}}{\%}$	$\frac{P_k, \text{кВт}}{\%}$	$\frac{M_{п}, \text{Нм}}{\%}$	
АИР71А4	6,8	3,3	7,79	$\frac{1,2}{17,6}$	$\frac{0,12}{3,6}$	$\frac{0,196}{2,5}$	$\frac{4,5}{66} \text{ }_O$	$\frac{2,16}{65} \text{ }_O$	$\frac{7,55}{97} \text{ }_O$	Опыт. данные
200L2	425	111	196	$\frac{109}{26}$	$\frac{48}{43}$	$\frac{127}{65}$	-	-	-	Опыт. данные
				$\frac{100,1}{23,5}$	$\frac{28}{25,2}$	$\frac{108,8}{55,2}$	-	-	-	Расчет. данные до нагрева
							$\frac{200}{47,1} \text{ }_R$	$\frac{80}{72} \text{ }_R$	$\frac{184}{93,8} \text{ }_R$	Опыт. данные
							$\frac{199}{46,9} \text{ }_R$	$\frac{71,1}{64,1} \text{ }_R$	$\frac{157}{80,3} \text{ }_R$	Расчет. данные

Выводы.

Методика электромагнитных расчетов двигателей с учетом поперечных токов и особенностей, обусловленных скосом пазов, обеспечивает отклонение между расчетными и экспериментальными данными, в особенности по кратностям моментов и пускового тока, до 10%.

Обусловленное термическим воздействием (отжиг при температуре $520 \text{ } ^\circ\text{C}$) увеличение пускового, минимального и максимального моментов асинхронных двигателей может быть использовано на практике.

Експериментально встановлено, що при нагріванні ротора со срезаними кільцями при температурі $250\div 300$ °С происходит скачкообразное уменьшение сопротивления изоляции клетки ротора и существенное до 100 % увеличение тока и момента двигателя.

1. Haintsev Yu.V. Stray load losses in iduction motors. Moskva: Energoizdat, 1981. 184 p. (Rus)
2. Serrano-Iribarnegaray L., Martinez-Roman J. Critical review of the analytical approaches accounting for interbar currents and experimental study of ageing in two-speed asynchronous motors for elevator drives. *IEE Proceedings Electric Power Applications*. 2005. Vol. 152. No 1. Pp. 72-80.
3. Williamson S., Smith A.C. Equivalent circuits for cage induction motors with inter-bar currents. *IEE Proceedings Electric Power Applications*. 2002. Vol. 149. No 3. Pp. 173–183.
4. Heller B., Hamata V. Supreme of a harmonic in induction motors. Moskva: Energiia, 1981. 352 p. (Rus)
5. Williamson S., Poh C.Y. Inter-bar currents in cage induction motors. *Electric Power Applications*. 2005. Vol. 152. No 5. Pp. 1106 – 1112.
6. Hurin Y.S., Kuznetsov B.I. Designing of series of electrical machines. Moskva: Energiia, 1978. 480 p. (Rus)
7. Finkelshtein V.B. Certificate of registration of copyright for a work Computer program for verification calculation of three-phase induction motors with allowance for slanting of grooves and transverse current. UA № 76390, 2018. (Ukr)

УДК 621.313.333

ВЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПОПЕРЕЧНИХ СТРУМІВ І ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ РОТОРА

В.Б. Фінкельштейн¹, докт.техн.наук, **Д.М. Калюжний¹**, канд.техн.наук, **Ю.В. Ковальова¹**, канд.техн.наук, **А.М. Гетья²**

¹- Харківський національний університет міського господарства імені А.Н. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна, email: finalvb@gmail.com ,

²- ТОВ СКБ УКРЕЛЕКТРОМАШ,
вул. Іскринська, 37, Харків, 61005, Україна, email: andynikan@gmail.com

Розроблено методику розрахунку проєктованих асинхронних двигунів зі скосом пазів із заданою величиною опору ізоляції клітки ротора. Лінія з розподіленими параметрами, що є моделлю ротора за наявності поперечних струмів, замінена 70 елементарними контурами. Теоретично й експериментально встановлено, що поперечні струми значно збільшують моменти двигуна. Отримано криві залежностей кратності моментів двигуна від величини питомого опору ізоляції клітки ротора. Експериментально встановлено, що у разі нагрівання ротора струмами в клітці при температурі порядку $250\div 300$ °С відбувається стрибок опору ізоляції стрижнів, що призводить до збільшення струму й моменту. Бібл. 7, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: опір ізоляції клітки ротора, стрибок опору, поперечні струми, скос пазів, лінія з розподіленими параметрами.

INFLUENCE OF CROSS-CURRENT CURRENTS ON CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTORS

V.B. Finkelshtein¹, **D.N. Kalyuzhnyi¹**, **Yu.V. Kovalova¹**, **A.N. Getya²**

¹- A.N. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
17, Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine, email: finalvb@gmail.com ,

²- SKB UKRELEKTROMASH,
37, Iskrinska Street, Kharkiv, 61005, Ukraine, email: andynikan@gmail.com

To calculate the design of asynchronous motors with bevel grooves with a given value of the resistance of insulation of the rotor cell developed a technique. The line with distributed parameters, which is a model of the rotor in the presence of transverse currents, is replaced by 70 elementary circuits. It has been theoretically and experimentally established that transverse currents significantly increase the moments of the engine. The dependences of the multiplicity of the motor moments on the value of the resistivity of the insulation of the rotor cell are obtained. It has been experimentally established that when the rotor is heated by currents in a cell, at a temperature of the order of $250\div 300$ °C, the resistance of rod insulation increases, which leads to an increase in current and torque. References 7, tables 2, figures 4.

Key words: squirrel-cage rotor, insulation resistance, resistance jump, transverse currents, bevel of slots,

Надійшла 05.09.2017
Остаточний варіант 13.06.2018