

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Особенности похода к проектированию частотно-регулируемых асинхронных двигателей

Ныне широко применяется энергосбережение средствами регулируемого электромеханического преобразователя. Повсеместное внедрение регулируемого электромеханического преобразователя дает возможность также совершенствовать технологические процессы, обеспечивает комплексную механизацию и автоматизацию производства, способствует повышению качества продукции, снижения ее себестоимости, росту производительности труда, повышению надежности и срока службы оборудования.

Работа асинхронных двигателей в регулируемом электромеханическом преобразователе характеризуется важными особенностями, определяемыми специфическими техническими требованиями, которые к ним предъявляются. Эти особенности связаны с изменяющимися в заданных пределах (а часто и по заданным закономерностям) значениями частот вращения двигателя, величинами частоты, напряжения и тока питания двигателя или с наличием и необходимостью учета временных высших гармонических составляющих[5].

Специфическими являются математические модели (ММ) электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловентиляционных процессов в постоянных и переходных режимах работы двигателей, расчеты дополнительных магнитных потерь, механических и виброакустических показателей, построенные на усовершенствованных расчетных методиках.

Использование серийных асинхронных двигателей в ЭП с полупроводниковыми преобразователями (ПП) не является оптимальным по массогабаритным, энергетическим и другим показателям. По некоторым

оценкам, использование обычных серийных асинхронных двигателей в частотном приводе снижает КПД и требует повышения ин установленной мощности на 15-20% при работе в постоянных режимах и до 40-45% при работе в динамических режимах. Из-за высших гармоник напряжения и тока на выходе преобразователя частоты (ПЧ) потери в двигателе возрастают на 5-6%.

Также есть потребность в проектировании специальных регулируемых асинхронных двигателей (АД) с улучшенными регулировочными, динамическими и виброакустическими свойствами. Применение АД, спроектированных с учетом специфики их работы в условиях регулируемого электромеханического преобразователя вместо общепромышленных асинхронных двигателей, дает возможность значительно снизить массу, габариты и стоимость электроприводов, улучшить их функциональные показатели[6].

Если оптимально спроектировать двигатель для частотного регулирования можно получить на 25% большую мощность, чем в общепромышленных асинхронных двигателях тех же габаритов, или уменьшить объем при той же мощности.

Техническими предпосылками, обеспечивающими преимущества адаптированных регулируемых двигателей над серийными машинами, являются [5]:

- Отсутствие требований к пусковым характеристикам (не ставится задача обеспечения кратностей пускового и максимального моментов), в связи с чем может быть применена соответствующая форма паза ротора (отказ от глубоких пазов), что обеспечивает минимальное активное сопротивление обмотки ротора и меньшую индуктивность рассеивания;
- Необходимая частота вращения производственного механизма, обусловленная частотой питания двигателя, числом полюсов обмотки статора асинхронного двигателя и передаточным числом редуктора – ее можно обеспечить при разных сочетаниях этих трех величин;
- Возможность некоторого снижения перегрузочной способности асинхронного двигателя, поскольку система привода отслеживает параметры напряжения и тока питания двигателя;

- Использование эффективных систем само – и, по потребности, принудительного охлаждения;
- Возможность выбора оптимального, отличного от базового, соотношения нестандартных значений напряжения и частоты проектированного двигателя, согласованных с номинальными значениями преобразователя, что позволяет снизить массу и габариты;
- Усиление электроизоляции витков обмотки статора с целью защиты от импульсных перенапряжений;
- Использование соответствующих подшипников с учетом как высоких скоростей вращения, так и появления паразитных токов от высокочастотной коммутации.

Основные принципы и методология проектирования АД должны базироваться на рациональном подходе и определяться с учетом важной специфики их работы в составе электромеханического преобразователя как в постоянных, так и в динамических режимах[6].

Рациональный подход предусматривает рассмотрение АД во взаимодействии с другими элементами электромеханического преобразователя: силовой преобразовательной частью, системой управления и регулирования, исполнительным органом рабочей машины. Эффективность рационального подхода при проектировании АД базируется на учете особенностей отдельных составляющих электромеханического преобразователя, характере отношений и связей между ними.

Полупроводниковые преобразователи, которые отличаются типами, силовыми схемами, видами регулирования, законами управления и т.п., представлены разными ММ. Нагрузки электромеханического преобразователя имеют разные законы изменения моментов сопротивлений от частоты обращения и разные уровни. Они могут быть непрерывного или циклического действия. Все это должно найти отображение в ММ нагрузок.

Работа АД в системах из ПП имеет важную специфику, которая является причиной появления новых требований к параметрам и технико-экономическим показателям АД, в результате чего задача разработки машин для указанных систем переросла в самостоятельную проблему, которая включает и круг вопросов, связанных с определением оптимальных параметров двигателей. Для решения задач проектного синтеза и оптимизации таких двигателей не могут

быть применены стандартные методы и программное обеспечение, разработанные для АД общепромышленного назначения.

Между тем применение вентильных преобразователей частоты, с одной стороны, открывает перед электроприводом новые возможности, а с другой, импульсный характер работы современных вентильных преобразователей создает ряд проблем. Сегодня реальным процессам, происходящим в системе двигатель-преобразователь, разработчики не уделяют должного внимания. Обычно они берут серийный двигатель общепромышленного применения и подключают его к преобразователю частоты, совершенно не заботясь о совершенстве технических параметров, оптимальности и стоимости получаемой системы электропривода, а вопросы срока службы и надежности вообще остаются без внимания.

В серийных электродвигателях приводятся данные только для номинальных режимов. Если же рассматривать весь предел регулирования, то необходимо учитывать особенности взаимодействия двигателя с преобразователем, что усложняет задачу разработки и эксплуатации электропривода. Так, в электроприводах со скалярным регулированием в области низких частот из-за уменьшения индуктивных сопротивлений цепей статора при весьма малых их активных сопротивлениях резко возрастает не стабильность поддержания тока статора, а следовательно, и момента (рис.1), что особенно важно учитывать при проектировании частотно-регулируемых приводов для грузоподъемных средств (лифтов, кранов, талей, лебедок), рольгангов и транспортных средств[5].

В области частот выше номинальных магнитный поток машины уменьшается не прямо пропорционально частоте, а гораздо интенсивнее за счёт

увеличения индуктивности статора. На практике эти трудности обычно пытаются преодолеть, завышая установленную мощность двигателей и преобразователей частоты, что в целом значительно удорожает электропривод.

Отсюда следует вывод, что совершенствование двигателей за счёт разработка специальных двигателей для каждого конкретного привода приносит, как показал наш опыт, большой эффект благодаря снижению стоимости привода, повышению качества технологического процесса и повышению надёжности системы в целом.

Таким образом, двигатель, предназначенный для работы от преобразователя частоты, должен обладать конструкцией, принципиально отличной от двигателей общепромышленного производства.

Это, прежде всего, относится к разработке двигателей, имеющих другую магнитную систему, другую конфигурацию пазов ротора и материалов короткозамкнутой клетки.

Самыми актуальными разработками АД сейчас видимо являются высокоэффективные (с повышенным КПД) и частотно-регулируемые, в том числе тяговые - для транспортных средств различной мощностью и назначения[21].

Данный проект состоит из повышения эффективности использования в промышленных трехфазных асинхронного двигателя, в 7,5 и 2,2 кВт, с использованием умеренных поданных медных клеток ротора и наиболее подходящих магнитных материалов (с высокой проницаемостью и / или низкой потерей).

Целью проекта является анализ и строительство нескольких прототипов асинхронных моторов путем использования вышеупомянутых новаторских технологических решений, в целях:

- определение процедура проектирования и разработки стратегий;
- Проверить фактическое повышение эффективности;

Следующая разработка стратегии была расследована:

- изменение ширину зубцов, высоту ярмо ротора алюминией клеткой, не меняя остальных размеров двигателя;
- изменение число витков статора и длину двигателя, не меняя остальных размеров двигателя;
- применение медную клетку вместо алюминий клеткой, не меняя размеров двигателя (решение без каких-либо дополнительных затрат);

4.2. Законы регулирования скорости АД и выбор расчетных частот

Для того чтобы асинхронный двигатель работал при разных частотах с практически постоянными значениями КПД коэффициента мощности, перегрузочной способностью и с постоянным абсолютным скольжением, необходимо одновременно с изменением частоты регулировать также значение напряжения в зависимости от частоты и момент по следующему закону:

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (4.1)$$

Где U'_1 и M' - напряжение и вращающий момент, соответствующие частоте f'_1 . Соотношение (4.1) справедливо при ненасыщенной магнитной системе.

Возможны три основных случая регулирования скорости вращения в зависимости от нагрузки на валу.

Работа двигателя при постоянном моменте на валу, т.е. при $M=\text{const}$

В этом случае на основании (4.1) имеем

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \quad (4.1 \text{ а})$$

Подводимое к двигателю напряжение должно измениться пропорционально частоте. На основании уравнения равновесия напряжения для обмотки статора

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1, \quad (4.2)$$

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 K_{001} \Phi_m, \quad (4.3)$$

При пренебрежении падением напряжения $I_1 Z_1$, можно написать

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f_1 w_1 K_{001}} \quad (4.4)$$

Отсюда следует, что при условии (4.1 а) амплитуда магнитного потока остается практически постоянной, а значит, и насыщение магнитной системы будет неизменным.

Повышение частоты f_1 будет вызывать пропорциональное возрастание скорости вращения двигателя и его полезной мощности. Поэтому при условии (4.1 а) ток статора будет незначительно увеличиваться вследствие возрастания потерь в стали статора и механических потерь в двигателе. Можно считать, что наиболее тяжелым режим работы двигателя в тепловом отношении будет при минимальной частоте из-за ухудшения условий от движения. Следовательно, при работе двигателя с постоянным моментом на валу расчет двигателя нужно выполнять для изменения скорости вращения [32].

Работа двигателя при постоянной мощности на валу, т.е. при $P_2 = \text{const}$

При постоянной мощности момент двигателя изменяется обратно пропорционально скорости вращения и, следовательно, частоте:

$$\frac{M'}{M} = \frac{f}{f'} \quad (4.5)$$

$$\frac{U_1'}{U_1} = \sqrt{\frac{f'}{f}} \quad (4.6)$$

Так как напряжение возрастает медленнее, чем частота, то, следовательно, в соответствии с (4.1 б) наибольшим магнитный поток Φ_m будет при минимальной частоте. В связи с тем, что полезная мощность на валу постоянна, а напряжение, как это следует из (4.6), с увеличением частоты возрастает, то, даже при учете возрастания потерь в стали статора и механических потерь, ток, потребляемый двигателем из сети, будет уменьшаться. Таким образом, наиболее напряженной в тепловом отношении будет работа двигателя при минимальной частоте f_1 . Поэтому и рассчитывать двигатель, работающий с постоянной мощностью на валу, следует для наименьшей скорости вращения.

Работа двигателя на вентиляторную нагрузку, когда момент пропорционален квадрату частоты, т.е. $M = Kf_1^2$

При этом на основании (5.16) получим

$$\frac{U_1'}{U_1} = \left(\frac{f_1}{f_1'} \right)^2 \quad (4.7)$$

Подводимое к двигателю напряжение должно изменяться пропорционально квадрату частоты. А это значит, что в соответствии с (4.16) повышение частоты будет сопровождаться увеличением амплитуды магнитного потока. С другой стороны, так как момент меняется пропорционально квадрату частоты, то, следовательно, полезная, значит, и потребляемая мощности будут практически пропорциональны кубу частоты. Поэтому с увеличением частоты ток статора будет возрастать. Поскольку на наибольшей частоте магнитный поток и ток статора имеют максимальные значения, то и рассчитывать двигатель необходима для этой частоты.

Потери, обусловленные несинусоидальностью напряжения

Высшие гармоники в кривой выходного линейного напряжения преобразователя частоты создают соответствующие высшие временные гармоники тока. В свою очередь, эти гармоники тока приводят к образованию

гармоник магнитной индукции тех же порядков, что и основная гармоника тока. А это значит, что во всех случаях наиболее сильной будет первая пространственная гармоника индукции[32].

Высшие временные гармоники тока будут обуславливать в обмотках статора и ротора дополнительные электрические потери. Гармоники же магнитной индукции, соответствующие высшим временным гармоникам тока, будут создавать дополнительные потери в стали.

Оценим возможный уровень перечисленных дополнительных потерь в предположении, что выходное линейное напряжение преобразователя частоты имеет прямоугольную форму. При этом условия амплитуды высших гармоник напряжения будут обратно пропорциональны их порядкам. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по отношению к высшей гармонике тока пропорционально порядку этой гармоники. Из этого следует, что амплитуда намагничивающего тока высшей временной гармоники оказывается обратно пропорциональной квадрату порядка этой гармоники. Это же утверждение справедливо и для амплитуд гармоник магнитной индукции, созданных указанными токами.

Известно, что потери на вихревые токи в стали пропорциональны квадрату магнитной индукции и квадрату частоты перемagnetивания. С учетом изложенного можно заключить, что потери на вихревые токи в стали от гармоник магнитной индукции, вызванных временными гармониками тока, будут обратно пропорциональны квадрату порядка этих гармоник тока.

Токи обмотки ротора, соответствующие высшим временным гармоникам тока обмотки статора, из-за большого индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора, будут практически в противофазе с ними, т.е. будут вызывать значительный размагничивающий эффект, обуславливая снижение амплитуд гармоник магнитной индукции. По этой причине действительные значения потерь в стали будут еще меньше.

Что же касается электрических потерь в обмотках статора и ротора от высших временных гармоник токов этих обмоток, то они будут обратно пропорциональны четвертым степеням порядков гармоник и, следовательно, много меньше электрических потерь от основной гармоники тока.

Учитывая малую величину перечисленных дополнительных потерь, их без особой погрешности можно учесть, удваивая величину добавочных потерь двигателя, работающего от источника синусоидального напряжения [6].

В зависимости от способа регулирования частоты вращения указывается либо значение момента на валу M_2 , либо мощности на валу P_2 , либо вид вентиляторной характеристики $K\omega_2^3$.

Для частоты указывается три значения: f_{min} , f_{cp} , f_{max} .

4.3. Определение основных размеров частотно-управляемого асинхронного двигателя

Наружный диаметр ротора (предварительно)

$$D'_{н2} = 1.6 \sqrt{\frac{K_\mu M_{2н}}{\omega_1 s_n \gamma_2 K_{r2} K_{\alpha 2}^2 B_f^2} \left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{p K_f \xi^2} \right)} \quad (4.8)$$

При вычислении температурного коэффициента сопротивления обмотки ротора K_μ можно принять температуру ротора $\vartheta = 75^\circ\text{C}$, и тогда $K_\vartheta = 1.22$.

Для удобства введем понятие расчетного режима, под которым будем понимать режим, наиболее тяжелый в тепловом отношении для каждого способа регулирования скорости двигателя. Этому режиму соответствует синхронная угловая скорость[32]

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (4.9)$$

Момент на валу двигателя $M_{2н}$ и фазное напряжение обмотки статора $U_{1ф}$. При определении ω_1 в качестве частоты f_1 принимается одно из значений: f_{min} или f_{max} . Значение момента $M_{2н}$ берется непосредственно из задания или рассчитывается по одной из формул:

$$M_{2H} = \frac{P_2}{\omega_1(1 - s_H)} \quad (4.10)$$

$$M_{2H} = K\omega_1^2(1 - s_H)^2 \quad (4.11)$$

Коэффициент K_{22} определяется по формуле

$$K_{22} = 1 - \frac{B_\delta}{K_c B_{22}} \quad (4.12)$$

Чтобы исключить насыщение магнитной системы, максимально значение магнитной индукции в зубцах ротора следует принять $B_{22} = 1.8$ Тл. При выборе значений магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ можно воспользоваться следующими данными;

S_1 ,кВ.А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B_δ ,Тл	0.620	0.628	0.635	0.642	0.650	0.658	0.667	0.675	0.690	0.7

Полная мощность S_1 , в свою очередь, определяется следующим образом:

$$S_1 = \frac{P_1}{\eta \cos \varphi_1} \quad (4.13)$$

Где значение КПД η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ выбирается из табл. 6.1.

P_2 , кВт	$2p = 2$		$2p = 4$		$2p = 6$	
	η	$\cos \varphi_1$	η	$\cos \varphi_1$	η	$\cos \varphi_1$
1.1	0.775	0.87	0.75	0.81	0.74	0.74
1.5	0.81	0.85	0.77	0.83	0.75	0.74
2.2	0.83	0.87	0.80	0.83	0.81	0.75
3.0	0.845	0.88	0.82	0.83	0.81	0.76

4.0	0.865	0.89	0.84	0.84	0.82	0.81
5.5	0.875	0.91	0.855	0.85	0.85	0.80
7.5	0.875	0.88	0.875	0.86	0.855	0.81

Значение отношения $\xi = l_1/D$ выбирается из следующих рекомендаций:

2р	2	4	6
□	1.1-1.6	1.2-1.7	1.4-2.1

Остальные величины, входящие в формулу (6.1), имеют следующие числовые значения: $\gamma_2 = 32 \cdot 10^6 \text{ I/Ом.м}$; $K_{Г2} = 0.91$; $K_C = 0.93$; $K_f = 1.1$.

Диаметр расточки статора D_1 примем равным D'_{H2} , т.е. $D_1 = D'_{H2}$.

Длина пакета стали статора $l_1 = \xi D_1$.

Длина воздушного зазора в асинхронных машинах определяется допустимым током холостого хода, а также механическими соображениями воздушный зазор должен быть не менее $\delta = 2\sqrt{D_1 l_1} + a$, где $a = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Значения δ вычисляются с точностью до второго знака с последующим округлением, или до десятых долей миллиметра, или до таких чисел, как 0.25; 0.35 ит.д.

Наружный диаметр ротора $D_{H2} = D_1 - 2\delta$

Длина пакета стали ротора $l_2 = l_1$.

4.4 Зубцовые зоны статора и ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя

Определение числа пазов статора частотно-управляемого асинхронного двигателя. Зубцовое деление статора t'_1 для асинхронных машин мощностью от 1 кВт и выше должно находиться в пределах $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Тогда, предварительно, число пазов статора

$$Z_1' = \frac{\pi D_1}{t_1'} \quad (4.14)$$

И число пазов статора на полюс и фазу

$$q_1' = \frac{Z_1'}{2pm_1} \quad (4.15)$$

В асинхронных двигателях обычно принимают целое q_1 , поэтому q_1' округляют до ближайшего целого с последующим уточнением значений:

$$Z_1 = 2pm_1 q_1 \quad (4.16)$$

$$t = \frac{\pi D_1}{Z_1} \quad (4.17)$$

Шаг обмотки статора и обмоточный коэффициент

Если на статоре выбирается однослойная обмотка с концентрическими катушками, то она имеет диаметральный шаг $Y_\tau = \frac{Z_1}{2p}$, и тогда $Y_1 = Y_\tau$.

Двухслойная обмотка выполняется всегда с укороченным шагом

$$Y_1 = \beta_1 Y_\tau \quad (4.18)$$

где $\beta_1 = 0,80-0,86$, и тогда коэффициент укорочения обмотки статора

$$K_{y1} = \sin \beta_1 \frac{\pi}{2} \quad (4.19)$$

Коэффициент распределения обмотки обмотки статора

$$K_{p1} = \frac{\sin \pi / 2m_1}{q_1 \sin \pi / 2m_1 q_1} \quad (4.20)$$

и обмоточный коэффициент для обмотки статора $K_{с01} = K_{y1}K_{p1}$

Определение числа пазов ротора

Дополнительные электромагнитные силы и моменты, обусловленные высшими гармониками магнитного поля в воздушном зазоре, будут минимальными при определенном соотношении чисел пазов статора и ротора в зависимости от числа полюсов[32]. Значения Z_1 и Z_2 даны в табл.4.1.

Табл.4.1

Число пазов статора Z_1	Число пазов ротора Z_2											
	$2p=2$				$2p=4$				$2p=6$			
18	14	22										
24	16	32			20	32						
36	28	46			26	30	42	44	26	32	40	
48	38	40	58		30	56	60	62				
54									44	64	70	
60	48				44	52	74					
72									46	52	62	64

Расчет короткозамкнутой обмотки ротора

Геометрия зубцовой зоны ротора с овальными пазами. Зубцовый шаг ротора и ширину зубца ротора находим как

$$t_2 = \frac{\pi D_{H2}}{Z_2}, \quad b_{z2} = \frac{B_0}{K_c B_{z2}}, \quad (4.21)$$

Высоту и ширину шлица паза ротора принимают

$$h_{\text{ш2}} = 0.4 - 0.6 \text{ мм}; b_{\text{ш2}} = 1 - 2 \text{ мм}$$

Площадь овального паза ротора

$$Q_{\text{п2}}^1 = 0,7 \frac{K_{\text{п2}}^3 D_{\text{п2}}^2}{Z_2} \quad (4.22)$$

Радиус большей полуокружности овального паза

$$R_2 = \frac{\frac{1}{2} \left(D_{\text{п2}} - 2h_{\text{ш2}} - \frac{Z_2}{\pi} b_{\text{п2}} \right)}{\left(1 + \frac{Z_2}{\pi} \right)} \quad (4.23)$$

Радиус меньшей полуокружности овального паза

$$r_2 = \sqrt{\frac{\left\{ R_2^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{Z_2}{\pi} \right) + \frac{Z_2}{\pi} \right] - Q_{\text{п2}}^1 \right\}}{\left[\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{Z_2}{\pi} \right) \right]}} \quad (4.24)$$

Расстояние между центрами полуокружностей овального паза ротора

$$h_{\text{ц2}} = \frac{(R_2 - r_2)}{\operatorname{ctn} \frac{\pi}{Z_2}} \quad (4.25)$$

Высота паза ротора $h_{\text{п2}} = h_{\text{ш2}} + R_2 + r_2 + h_{\text{ц2}}$

Активное сопротивление стержня

Предварительно определим сечение стержня и его длину:

$$q_{\text{ст}} = K_{\text{г2}} Q_{\text{п2}}^1 = 0.91 Q_{\text{п2}}^1; \quad (4.26)$$

$$l_{\text{ст}} = l_2$$

тогда

$$r_{\text{ст}} = \frac{l_{\text{ст}} K_{\text{н}}}{\gamma_2 q_{\text{ст}}} \quad (4.27)$$

Размеры короткозамыкающего кольца

Толщина кольца

$$q_k = \frac{q_{ст}}{2K_f \sin \frac{\pi p}{Z_2}} = \frac{q_{ст}}{2.2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}} \quad (4.28)$$

Ширина кольца $a_k = \frac{q_k}{b_k}$.

Длина участка короткозамыкающего кольца между соседними стержнями

$$t_k = \frac{\pi(D_{H2} - b_k)}{Z_2} \quad (4.29)$$

Сопротивление двух участков кольца, приведенное к стержню,

$$r_k = \frac{t_k K_u}{2\gamma_2 q_k \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} \quad (4.30)$$

Активное сопротивление фазы короткозамкнутой обмотки ротора

$$r_2 = \frac{(r_{ст} + r_k)}{p} \quad (4.31)$$

Расчет обмотки статора

Длина лобовой части обмотки статора с достаточной точностью определяется по следующим формулам:

$$l_{\Delta 1} = 1.25\tau + 0.02 \text{ при } 2p=2;$$

$$l_{\Delta 1} = 1.25\tau + 0.02 \text{ при } 2p=4;$$

$$l_{\Delta 1} = 1.25\tau + 0.02 \text{ при } 2p=6;$$

где τ_y - шаг обмотки, выраженный через полюсное деление по середине высоту пазов статора:

$$\tau_y = \frac{[\pi(D_1 + h_{п1})\beta_1]}{2p} \quad (4.32)$$

Высоту паза статора в первом приближении можно принять $h_{п1} = 0.02 \text{ м}$.

Вспомогательный параметр

$$d = \frac{\frac{s_H}{s_m} + \frac{s_m}{s_H} - 2K_m}{K_m - 1} \quad (4.33)$$

где $s_m = 0.15 - 0.25$ - критическое скольжение.

Коэффициент

$$K_{x1} = \frac{2K_u S_m Z_2 (l_1 + l_{\Delta 1})}{K_{r1} K_{\sigma 1}^2 C_1 r_2 p \gamma_1 d D_1^2} \quad (4.34)$$

где $K_{r1} = 0.20 - 0.30$; $C_1 = 1.02 - 1.10$; $\gamma_1 = 57 \cdot 10^6$ I/Ом.м.

Коэффициенты

$$K_{d1} = (K_{c1} - K_{x1}) + \sqrt{K_{x1}^2 + \frac{4}{\pi} K_{x1}} \quad (4.35)$$

$$K_{x1} = 1 - \frac{B_\delta}{K_\sigma B_{x1}} \quad (4.36)$$

$$K_{c1} = 1 + \frac{B_\delta}{p K_\sigma B_{c1}} \quad (4.37)$$

где $B_{x1} = 1,8$ Тл – максимальная индукция в зубцах ротора;

$B_{c1} = 1,3$ Тл – максимальная индукция в сердечнике статора;

Площадь пазов статора при их трапецеидальной форме

$$Q_{n1} = K_{x1} D_1^2 \quad (4.38)$$

Наружный диаметр пакета стали статора

$$D_{H1} = K_{D1} D_1 \quad (4.39)$$

Полное сечение меди обмотки статора

$$Q_{m1} = K_{r1} Q_{n1} \quad (4.40)$$

Амплитуда полезного магнитного потока в воздушном зазоре

$$\Phi_N = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau_1 l_1; \quad \tau_1 = \frac{\pi D_1}{2p} \quad (4.41)$$

Число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора (предварительно)

$$W_1' = \frac{U_{1p}(1 - K_v)}{4.44 f_1 K_{\phi 1} \Phi_m} \quad (4.42)$$

где K_v - относительное падение напряжения в обмотке статора при нагрузке. Значения коэффициента K_v приведены ниже[46]:

s_1 , кВ.А	1.0	2.5	5.0	7.5	10	10.5
K_v	0.060	0.051	0.045	0.040	0.037	0.035

Число проводников в пазу статора

$$S_{\pi 1}' = \frac{2w_1' m_1 a_1}{Z_1} = \frac{w_1' a_1}{pq_1} \quad (4.43)$$

где $S_{\pi 1}'$ округляется до целого числа при однослойных обмотках и до четного числа при двухслойных обмотках. При мощности двигателя до 10 кВт число параллельных ветвей обмотки статора, как правило, $a_1 = 1$.

Сечение проводника обмотки статора (предварительно)

$$q_{m1}' = \frac{Q_{m1}}{2a_1 w_1 m_1} \quad (4.44)$$

Диаметр круглого проводника (предварительно)

$$d_{m1}' = \sqrt{\frac{4q_{m1}'}{\pi}} \quad (4.45)$$

с последующим выбором стандартного диаметра из следующего диаметра из следующего ряда:

1,00; 1,08; 1,16; 1,25; 1,35; 1,45; 1,56; 1,68; 1,81; 1,95;

2,10; 2,26; 2,44; 2,63; 2,83; 3,05; 3,28; 3,53; 4,10; 4,40; 4,70;

5,10; 5,50; 5,90; 6,40; 7,40; 8,00; 8,60; 9,30; 10,00.

Производные ряды меньших и больших размеров получаются из основного ряда перенесением запятой на один знак влево или вправо.

Размеры провода с изоляцией определяются по табл. 4 из [4]. При круглом сечении диаметр провода с изоляцией $d_{m1n} = d_{m1} + \Delta_n$ и сечение изолированного проводника $q_{m1n} = \frac{\pi}{4} d_{m1n}^2$.

После этого уточняется коэффициент заполнения паза статора изолированным проводом [48]

$$K_{п1} = \frac{q_{m1n} S_{п1}}{Q_{п1}^1} \quad (0.38-0.48) \quad (4.46)$$

где $Q_{п1}$ - площадь одного паза статора $Q_{п1}^1 = \frac{Q_{п1}}{Z_1}$

Активное сопротивление обмотки статора $r_1 = \frac{2(Q_1 + l_{A1}) w_1 K_{\phi}}{\gamma_1 z_1 q_{m1}}$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1 p}{Z^2} (w_1 K_{\phi 61})^2 \quad (4.47)$$

Проверка значения плотности тока в обмотке статора

ЭДС фазы короткозамкнутой обмотки ротора $E_2 = 2,22 f_1 \Phi_m$,

Ток обмотки ротора без учета индуктивного сопротивления рассеяния этой обмотки

$$I_2 = \frac{E_2 S_H}{r_2} \quad (4.48)$$

Приведенное значение тока обмотки ротора

$$I_2' = I_2 \frac{Z_2}{2 p m_1 w_1 K_{\phi 61}} \quad (4.49)$$

Плотность тока в проводниках обмотки статора

$$j_1 = \frac{I_1}{a_1 q_{M1}} \approx \frac{I_2'}{a_1 q_{M1}} < 6 - 8 \text{ А/мм}^2 \quad (4.50)$$

Геометрия зубцовой зоны статора

Зубцовый шаг статора

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1} \quad (4.51)$$

Ширина зубца статора

$$b_{z1} = t_1 \frac{B_\delta}{K_\sigma B_{z1}} \quad (4.52)$$

Высота и ширина шлица статора

$$h_{ш1} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_{ш1} = d_{M1H} + 1,6 \cdot 10^{-3}$$

Основные размеры трапецеидального паза: ширина паза по вершине

$$b'_{n1} = \frac{\pi}{Z_1} (D_1 + 2h_{ш1}) - b_{z1} \quad (4.53)$$

высота протрапецеидальной части паза статора

$$h'_{n1} = \frac{Z_1}{2\pi} \left[-b'_{n1} + \sqrt{b'^2_{n1} + \frac{4\pi}{Z_1} Q'_{n1}} \right]; \quad (4.54)$$

ширина паза по основанию

$$b''_{n1} = b'_{n1} + \frac{2\pi}{Z_1} h'_{n1}; \quad (4.55)$$

полная высота паза статора $h_{n1} = h'_{n1} + h_{ш1}; \quad (4.56)$

высота сердечника статора

$$h_{c1} = \frac{1}{2} (D_{H1} - D_1 - 2h_{n1}) \quad (4.57)$$

Магнитная индукция в сердечнике статора

$$B_{c1} = B_g \frac{D_1}{2pK_g h_{c1}} \quad (4.58)$$

Полученное значение индукции B_{c1} не должно существенно отличаться от ранее выбранного $B_{c1} = 1,3 \text{ Тл}$.

Далее расчет выполняется согласно методики проектирование [32].

4.5. Выбор оптимальных размеров пазовой зоны ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя

Основное требование -обеспечение высоких пусковых моментов при минимальных значениях пусковых токов - достигается за счёт применения клетки короткозамкнутого ротора с высокими значениями активного и реактивного сопротивлений. Это снижает энергетические характеристики для номинального режима работы и приводит к значительным тепловым потерям. Поэтому нормальная работа двигателей обеспечивается увеличенным расходом активных материалов[48].

С развитием частотного регулирования появляется возможность создания индивидуального высокодинамичного привода. В этом случае исключаются такие ограничивающие факторы, как кратности пусковых токов и работа в режиме КЗ (заторможенный ротор), создаётся возможность применения двигателей с высокими энергетическими характеристиками. Однако это должен быть специальный двигатель, рассчитанный для работы во всём диапазоне частот вращения с обеспечением требуемых моментов.

В двигателях, адаптированных для работы с преобразователями частоты, применены специальные схемы обмоток статора и системы изоляции, изменена конструкция пазовой зоны ротора и использованы специальные подшипники.

Система двигатель - преобразователь частоты должна быть полностью рассчитана и адаптирована к решению конкретной технологической задачи. Обычные серийные двигатели к этому не приспособлены[52].

При работе с преобразователем частоты новые двигатели обеспечивают высокие динамические свойства, высокую надёжность, сниженное потребление электроэнергии, что особенно важно при проведении реконструкции существующих станов и проектировании новых, поскольку разгружаются сети и снижаются установленные мощности фидерных систем. Двигатели более компактны и легко встраиваются в любые приводные системы. Низкое энергопотребление не только обеспечивает экономию электроэнергии, но и увеличивает срок службы и повышает безотказность работы при меньшей габаритной мощности преобразователей частоты.

Всё это снижает капитальные вложения при новом строительстве, а также при реконструкции и модернизации существующих систем приводов, одновременно уменьшая затраты на эксплуатацию.

С развитием частотного регулирования появляется возможность создания индивидуального эффективного привода. В этом случае исключаются такие ограничивающие факторы, как кратности пусковых токов и работа в режиме КЗ (заторможенный ротор), создаётся возможность применения двигателей с высокими энергетическими характеристиками. Однако это должен быть специальный двигатель, рассчитанный для работы во всём диапазоне частот вращения с обеспечением требуемых моментов[54].

В двигателях, адаптированных для работы с преобразователями частоты, применены специальные схемы обмоток статора и системы изоляции, изменена конструкция пазовой зоны ротора и использованы специальные подшипники. Система двигатель - преобразователь частоты должна быть полностью

рассчитана и адаптирована к решению конкретной технологической задачи. Обычные серийные двигатели к этому не приспособлены.

Широкое внедрение частотно-регулируемом асинхронном двигателем в последние годы подтвердило уникальные возможности таких приводов на основе преобразователя частоты как средства комплексного обеспечения задач автоматизации и энергосбережения. Целью исследования является рассмотрение возможности создания модернизированных АД, являющихся основой энергосберегающих технологий в регулируемом электроприводе. АД как электромеханический преобразователь энергии является основой силовой части электропривода. Энергоэффективность АД характеризуется уровнем КПД и коэффициентом мощности [57].

Для обеспечения эффективного энергосбережения были рассмотрены следующие пути модернизации:

- Изменение геометрии ротора
- Изменение длины статора
- Изменение число витков статора
- Выполнение коротко замкнутой клетки ротора из меди.

Исходными параметрами принята поперечная геометрия базовых машин: внешний и внутренний диаметры статора и пазовые зоны. Ограничивающими факторами расчета являлись коэффициент заполнения паза и нагрев обмотки статора. Для расчета тепловой картины машины использовался метод Тепловых схем, основанный на широком использовании Тепловых сопротивлений, которые соединяются в тепловую сеть, имитирующую реальные пути передачи тепловых потоков в машине. В качестве выходных параметров математической модели приняты энергетические характеристики КПД и $\cos(\varphi)$ [57].

Для моделирования были взяты АД с короткозамкнутый ротором спроектированные на мощность 2.2 кВт и 7.5 кВт. Для изменения размеров пазовой зоны ротора изменялись соответственно ширина зубца и высота ярмо ротора. Ширина зубца и высота ярмо ротора изменялись в диапазоне от 100% до

+115% от базовых величин. Полученные формы пазов ротора в результате изменения размеров показана на рис 4.1. Результаты расчетов для этих размеров ярмо и зубца ротора представлены соответственно на рис 4.2-4.19[59].

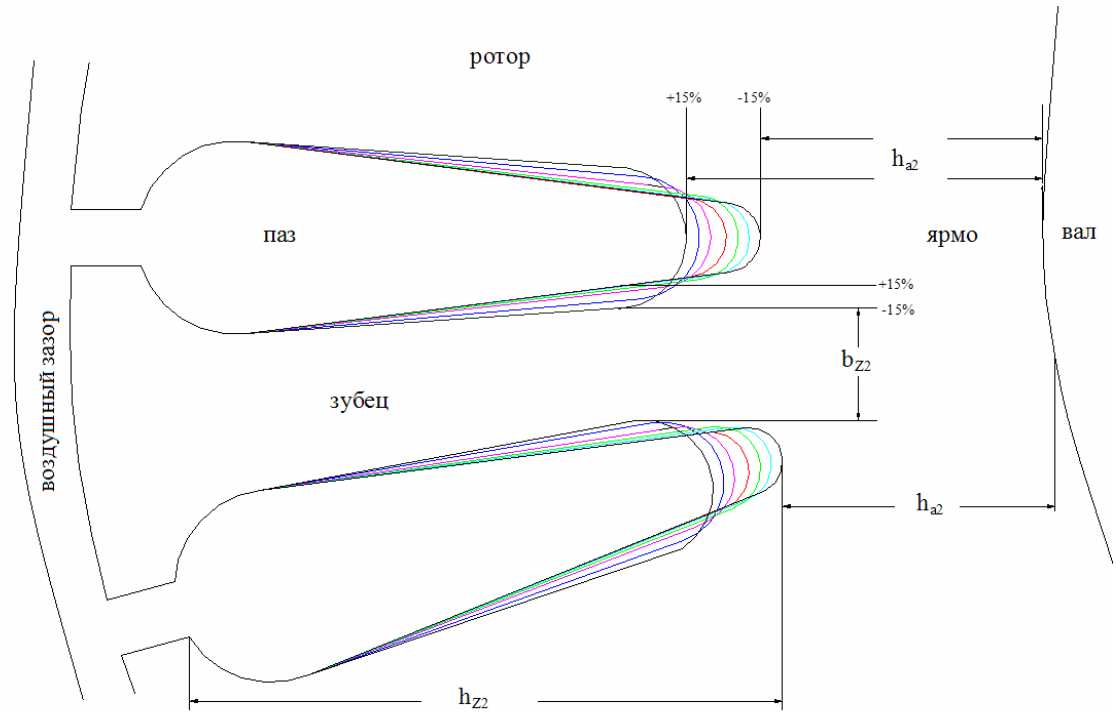


Рис.4.1. Модификация пазов ротора

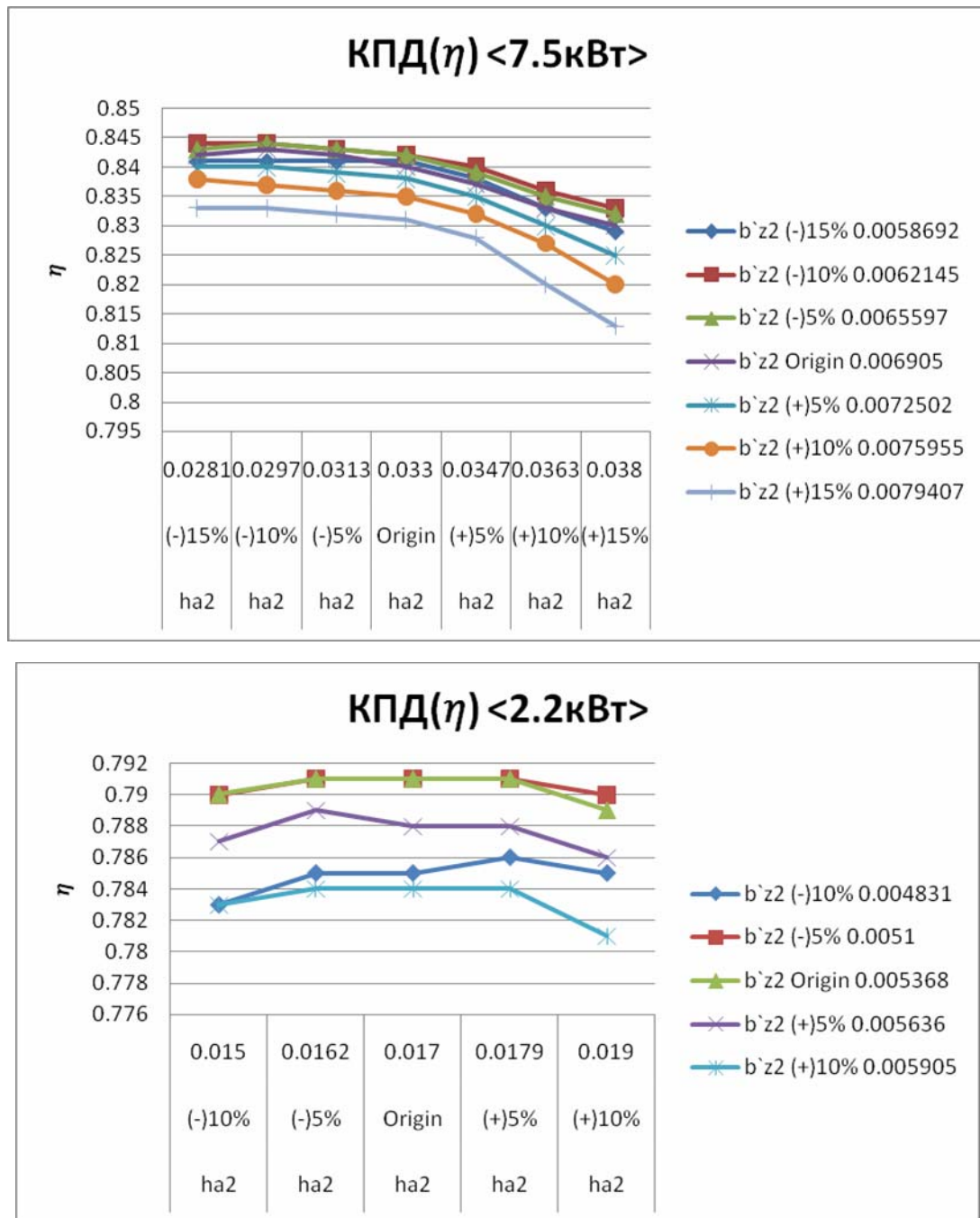


Рис.4.2. Сравнение КПД (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.2 (а и б) представлены результаты расчетов изменения КПД. Анализ этих кривых показывает что

- в двигателе мощностью 7,5кВт при уменьшении зубца (b_{z2}) и ярма ротора (h_{a2}) КПД увеличивается на 0,5%.

- в двигатель мощностью 2,2кВт в диапазоне изменения ярма ротора (h_{a2}) на $\pm 5\%$ процентов, и при базовой ширине зубца ротора (b_{z2}) получается максимальный КПД.

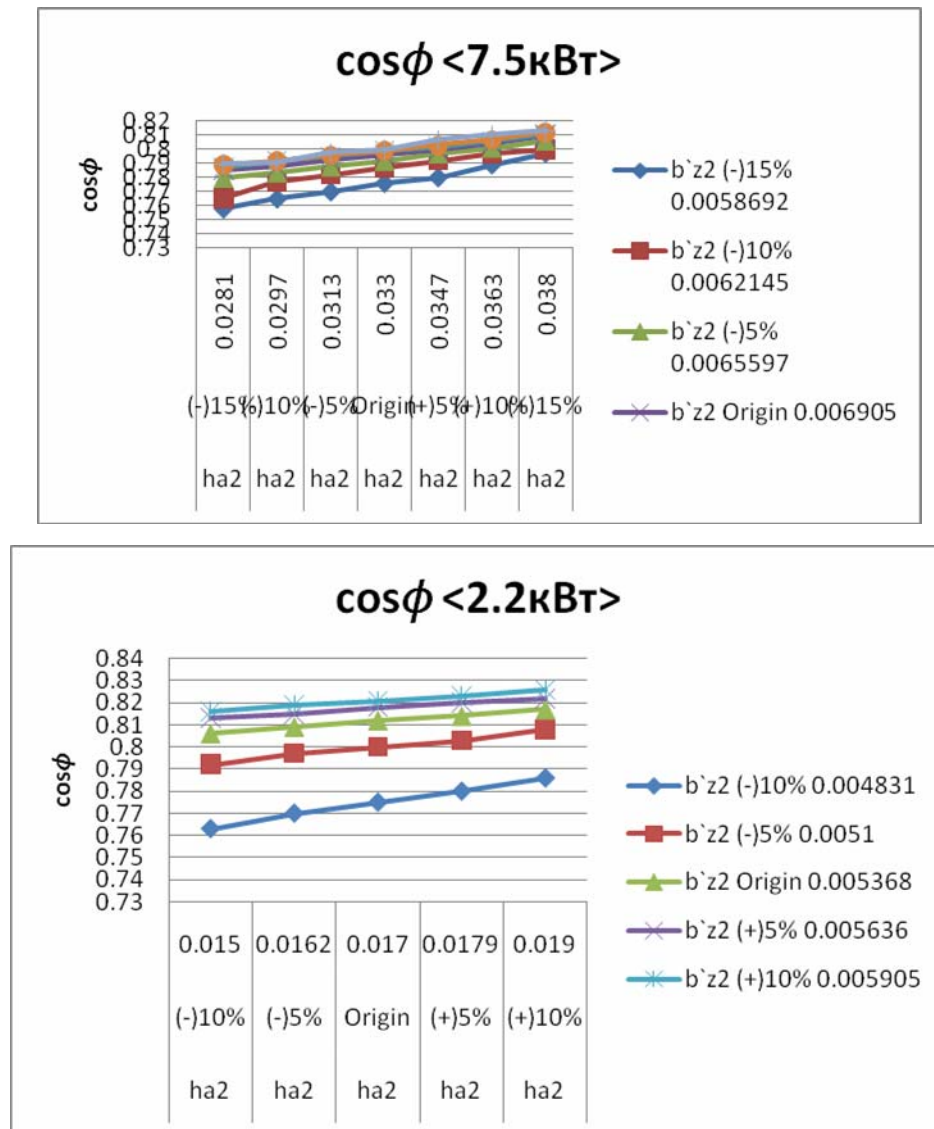


Рис.4.3. Сравнение cosφ (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.3(а и б) представлены результаты расчетов изменения cos(φ). Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7,5кВт при увеличении зубца (b_{z2}) и ярма ротора (h_{a2}) cosφ увеличивается.

- у двигателя мощностью 2,2кВт $\cos\varphi$ увеличивается так же как $\cos\varphi$ двигателя мощностью 7,5кВт.

Представляет интерес изменения токов статора и ротора, тока намагничивания а также номинального момента при сохранений постоянной полезной мощности.

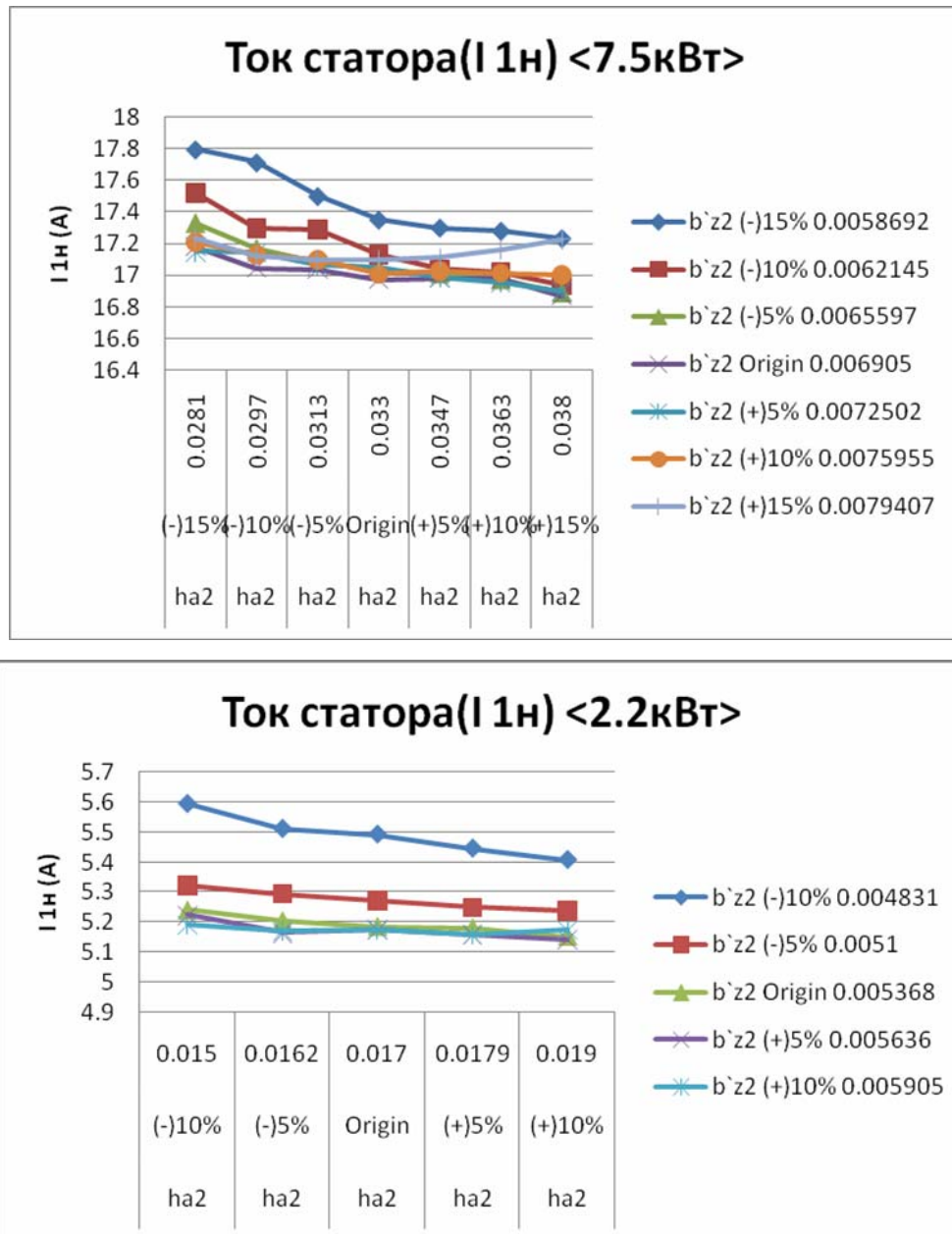


Рис.4.4. Сравнение I_1 (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.4(а и б) представлены графики зависимости изменения тока статора. Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7,5кВт при увеличении зубца (b_{z2}) и ярма ротора (h_{a2}) ток статора (I_1) уменьшается.
- у двигателя мощностью 2,2кВт ток статора (I_1) уменьшается так же как у двигателя мощностью 7,5кВт.

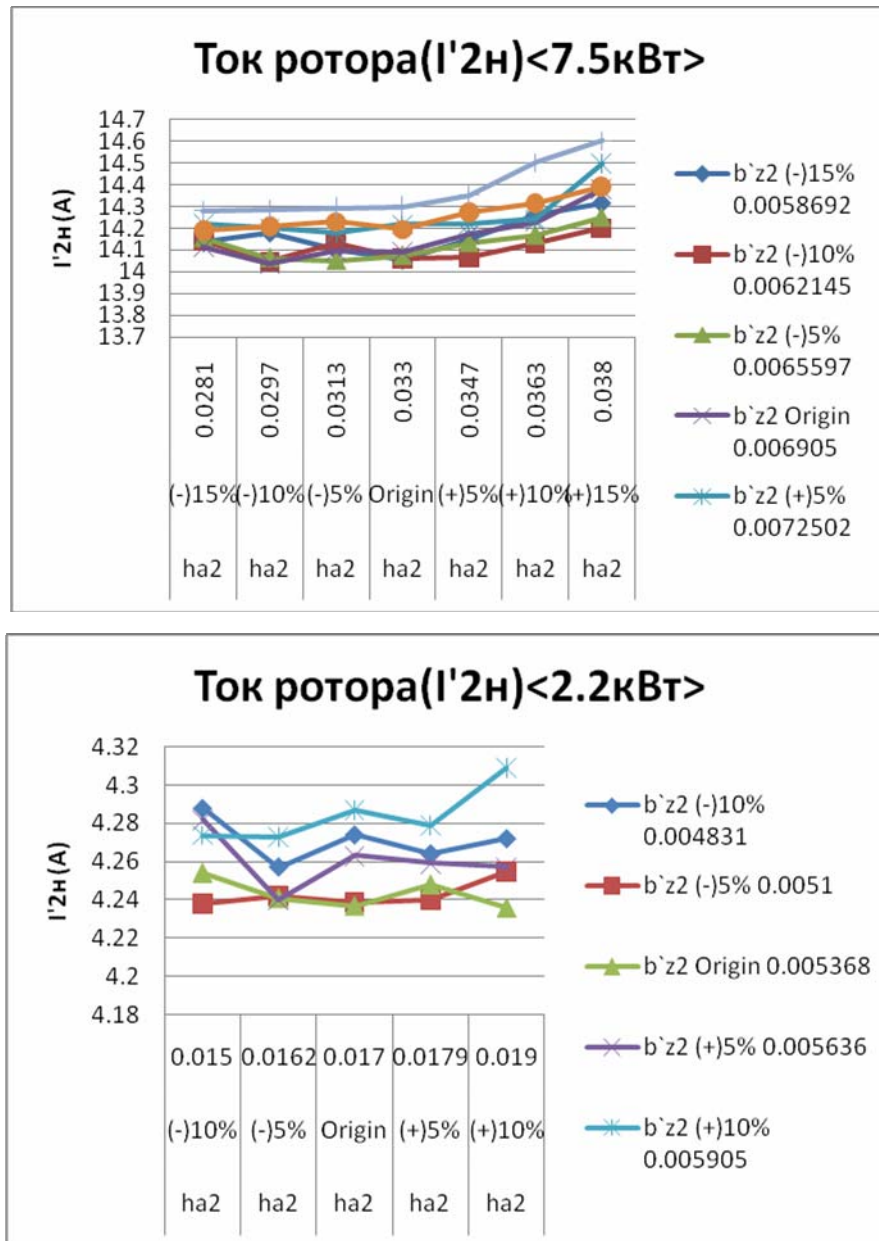
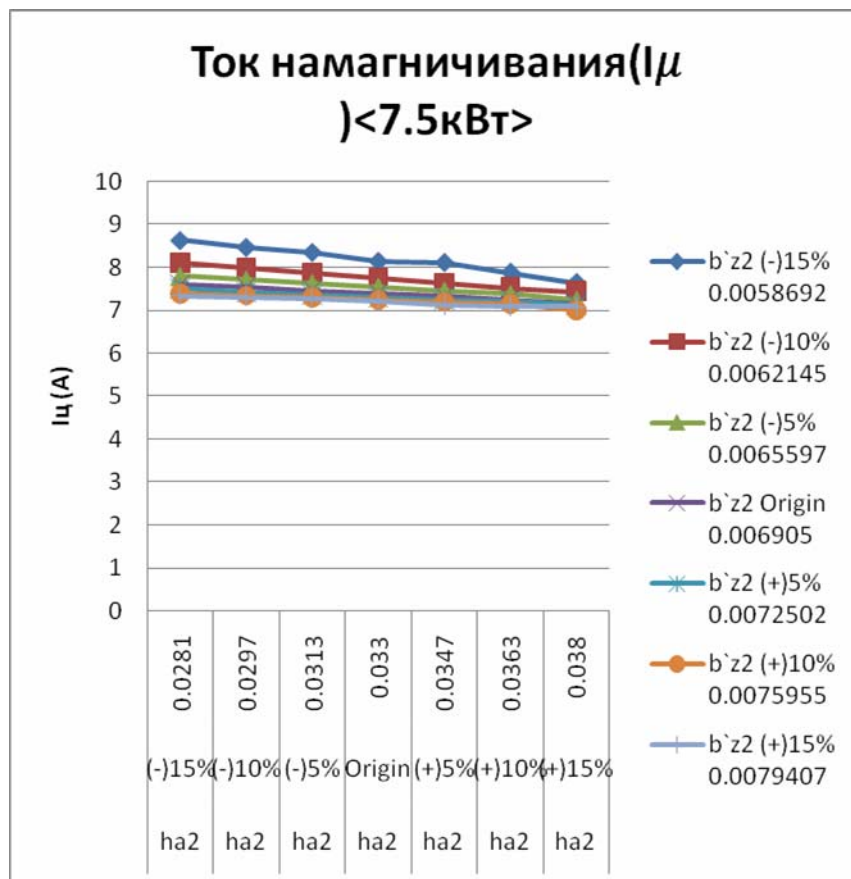


Рис.4.5. Сравнение I_2 (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.5(а и б) представлены графики зависимости изменения тока ротора. Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7,5кВт при увеличении зубца (b_{z2}) и ярма ротора (h_{a2}) ток ротора (I_2) увеличивается.
- у двигателя мощностью 2,2кВт ток ротора (I_2) при увеличении ширины зубца ротора (b_{z2}) на 10% и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}) на 10%.



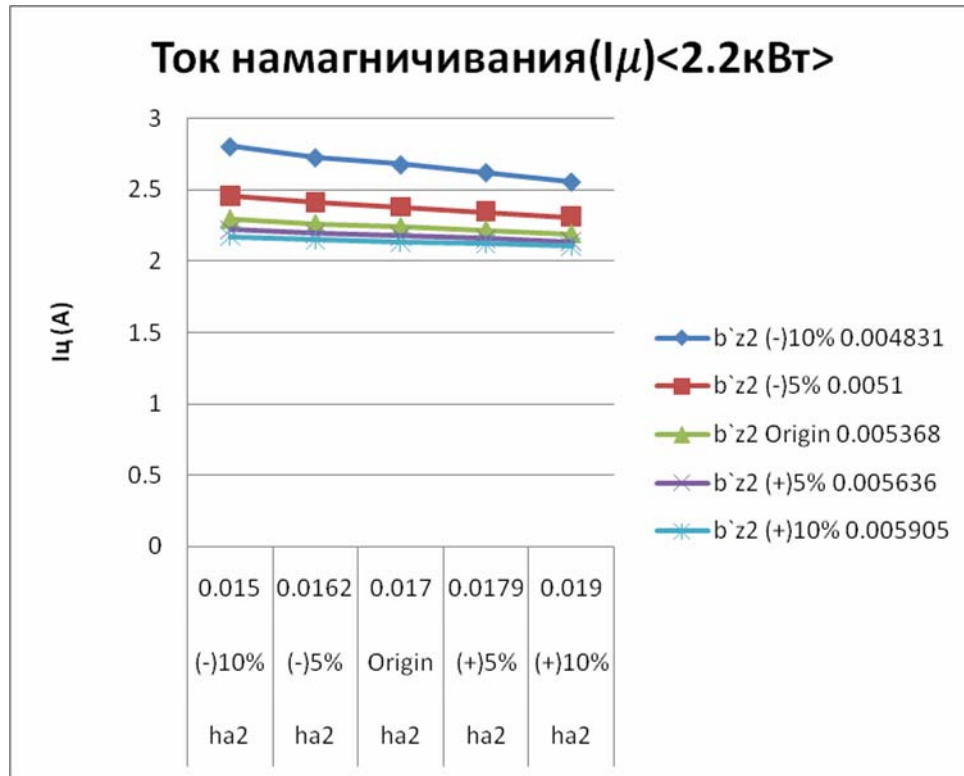


Рис.4.6. Сравнение I_μ (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.6 (а и б) представлены графики зависимости изменения тока намагничивания. Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7,5кВт при увеличении ширины зубца (b_{z2}) и высоты ярма ротора (h_{a2}), ток намагничивания (I_μ) уменьшается.
- у двигатель мощностью 2,2кВт так же как и у двигателя мощностью 7,5кВт.

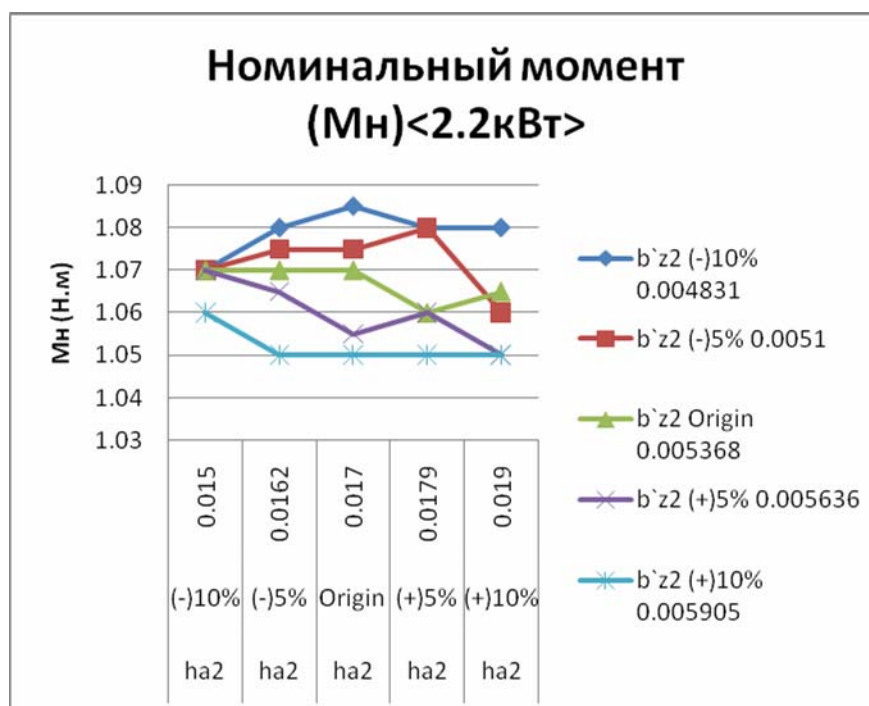
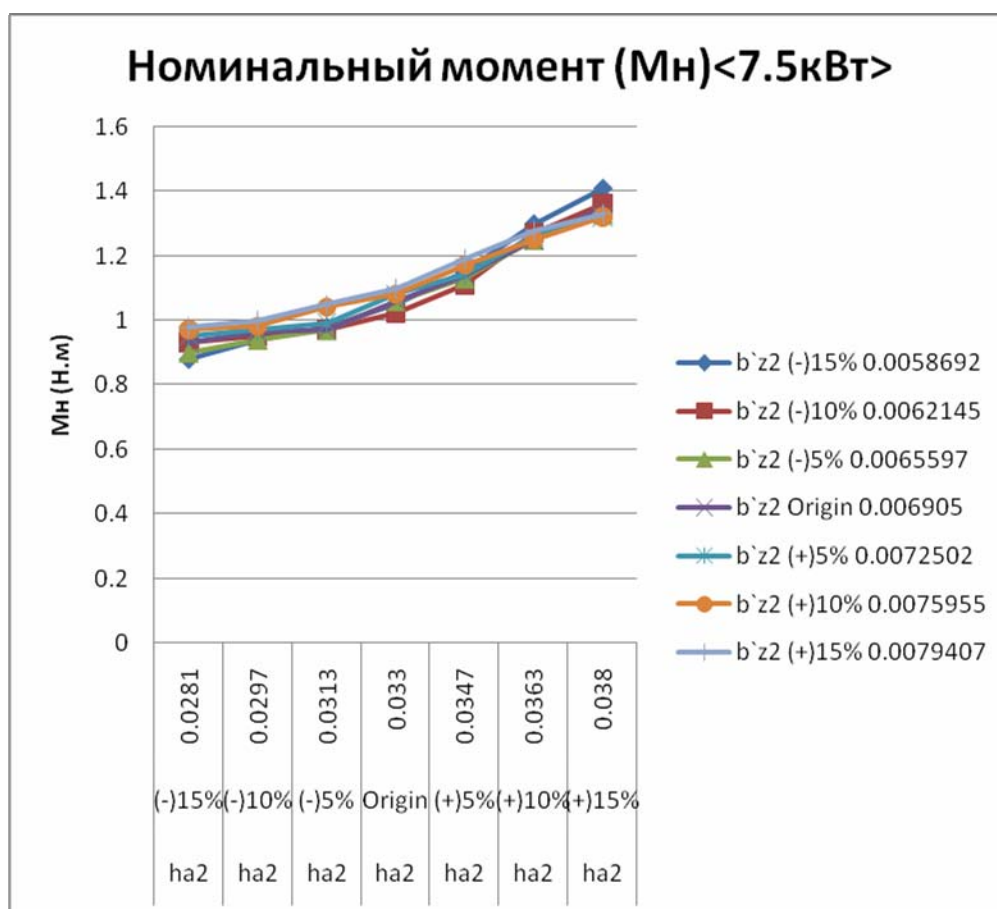
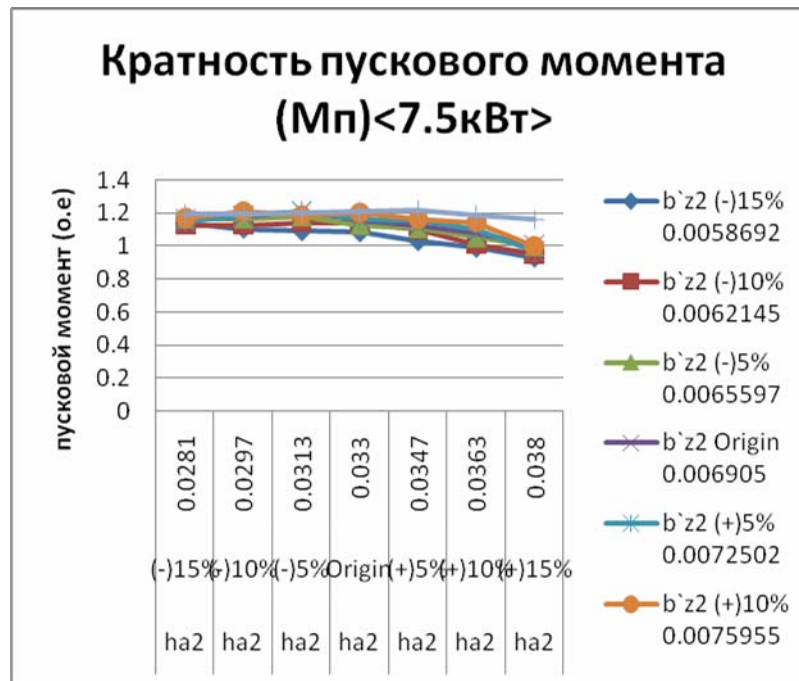


Рис.4.7. Сравнение M_n (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.7(а и б) представлены графики зависимости изменения номинального момента (M_H). Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7,5кВт самый высокий номинальный момент (M_H) при уменьшении ширины зубца (b_{z2}) на 15% и при увеличении высоты яра ротора (h_{a2}) на 15%.
- у двигателя мощностью 2,2кВт самый высокий номинальный момент (M_H) при уменьшении ширины зубца (b_{z2}) на 10% и при оригинальной высоте яра ротора (h_{a2}).



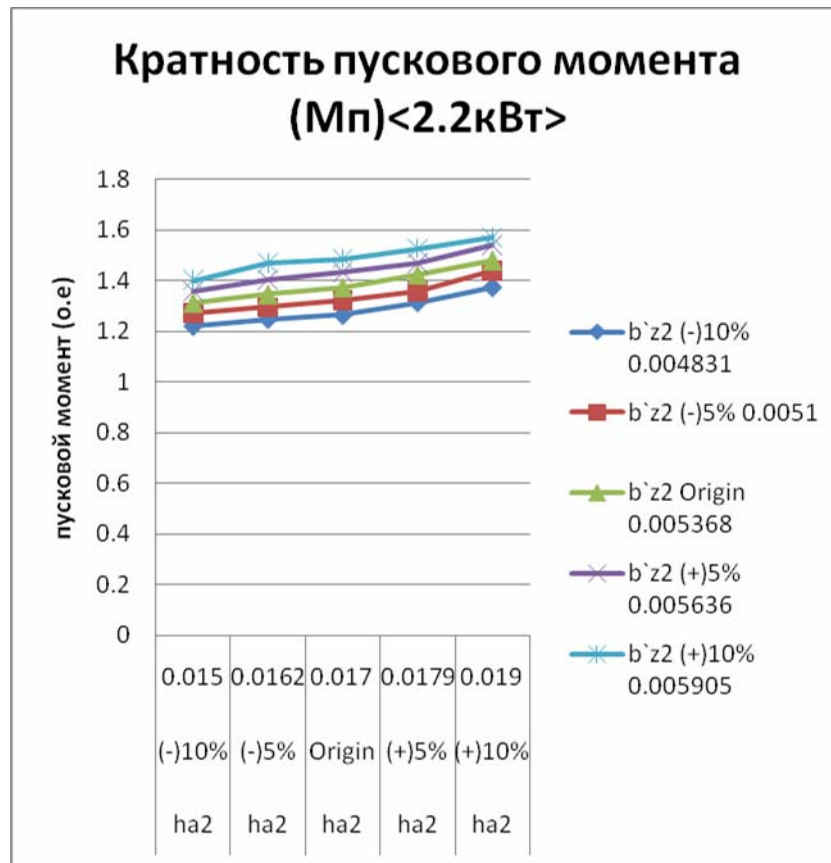


Рис.4.8. Сравнение кратность M_p (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.8(а и б) представлены графики зависимости изменения пускового момента (M_p). Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7,5кВт самая высокая кратность пускового момента (M_p) при увеличении ширины зубца (b_{z2}) на 15% и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}) на 5%.
- у двигатель мощностью 2,2кВт кратность пускового момента (M_p) увеличивается при увеличении ширины зубца ротора (b_{z2}) и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}).

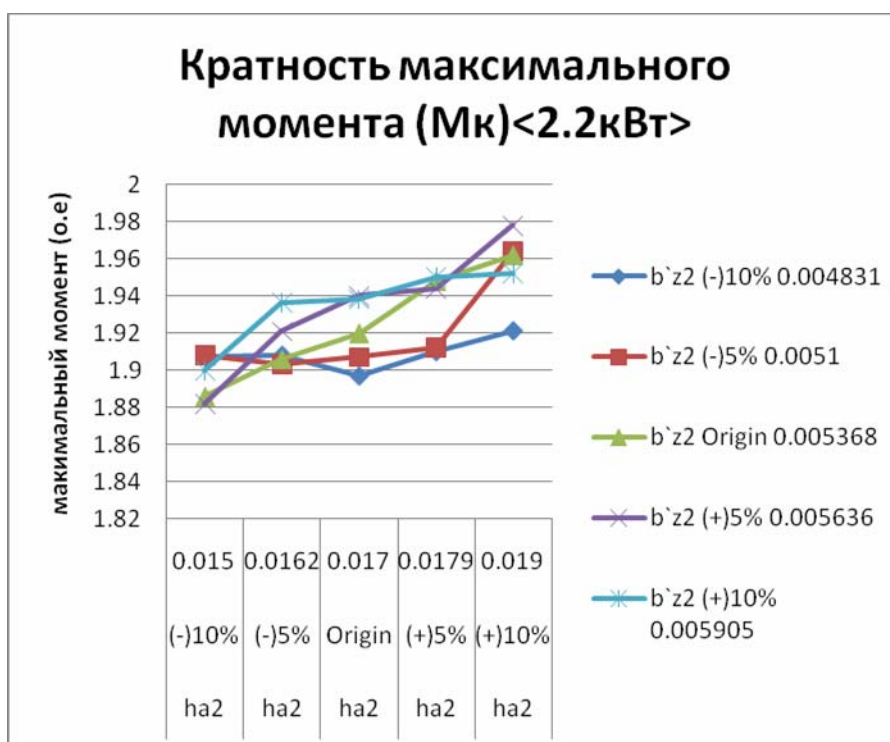
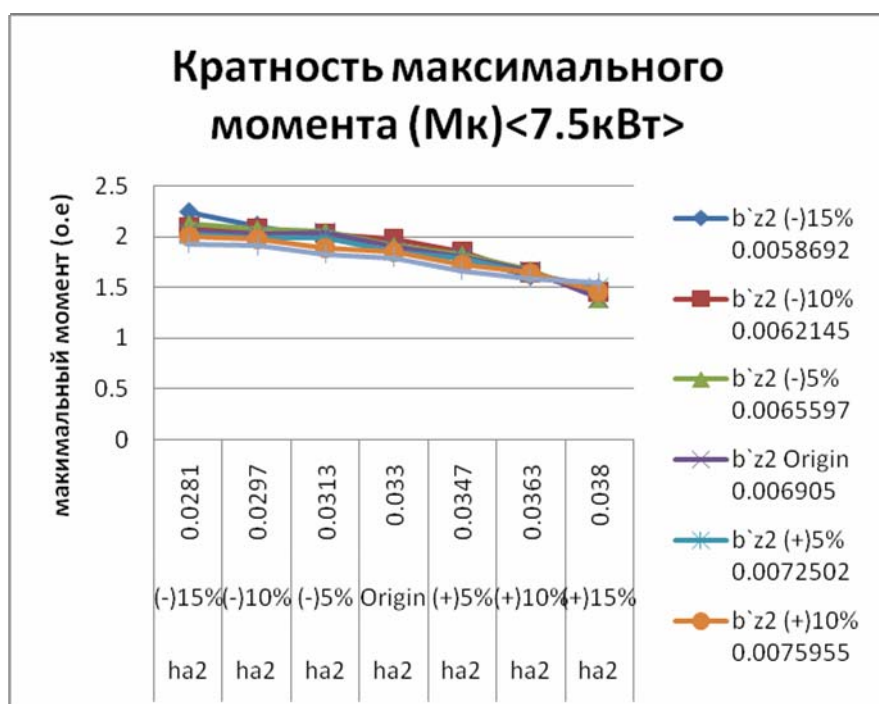


Рис.4.9. Сравнение кратность M_k (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.9(а и б) представлены графики зависимости изменения максимального момента. Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7,5кВт самая высокая кратность максимального момента при увеличении ширины зубца (b_{z2}) на 15% и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}) на 5%.
- у двигателя мощностью 2,2кВт кратность максимального момента увеличивается при увеличении ширины зубца ротора (b_{z2}) и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}).

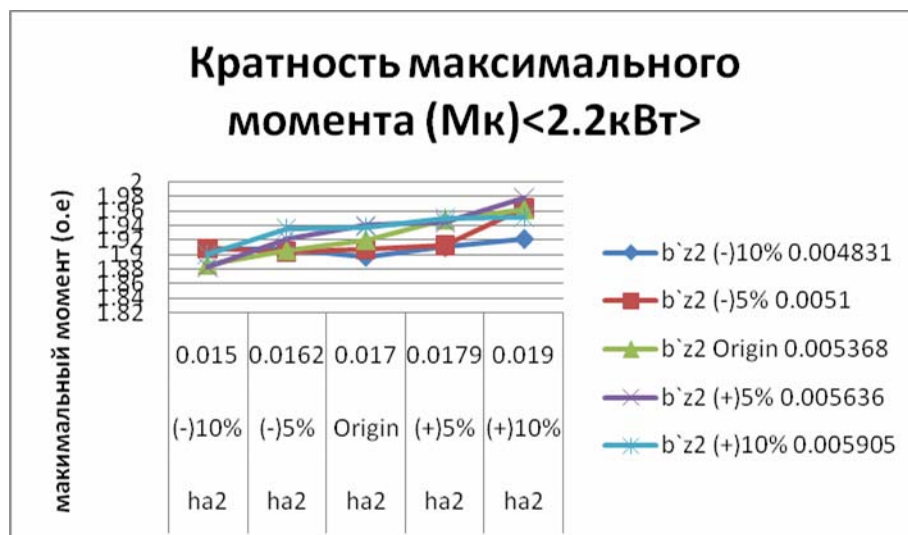
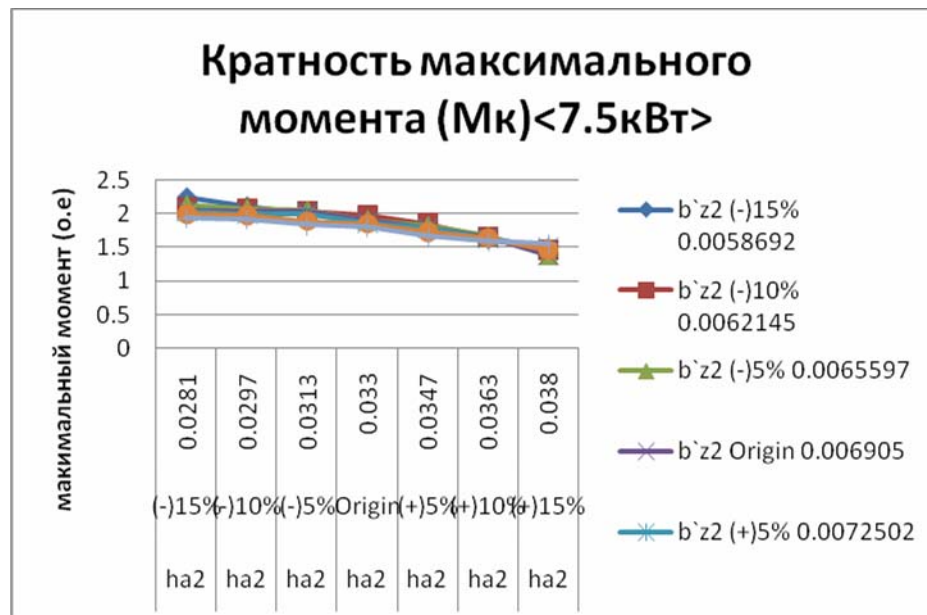
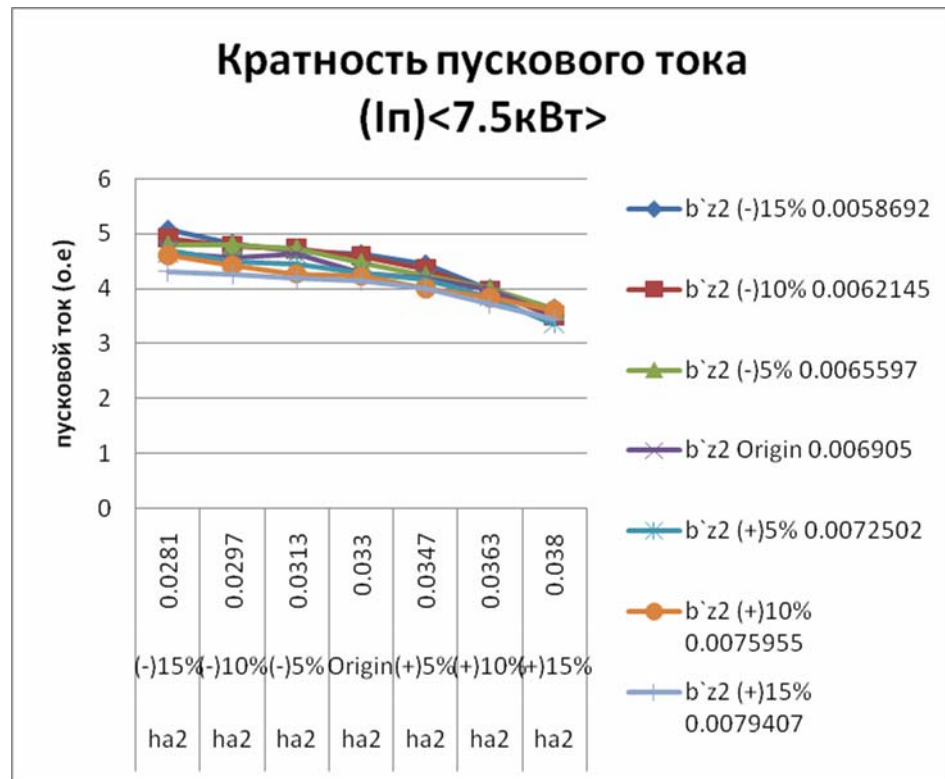


Рис.4.10. Сравнение кратность максимального момента (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.10(а и б) представлены графики зависимости изменения кратность максимального момента . Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7.5кВт самая высокая кратность максимального момента при увеличении ширины зубца (b_{z2}) на 15% и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}) на 5%.
- у двигатель мощностью 2.2кВт кратность максимального момента увеличивается при увеличении ширины зубца ротора (b_{z2}) и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}).



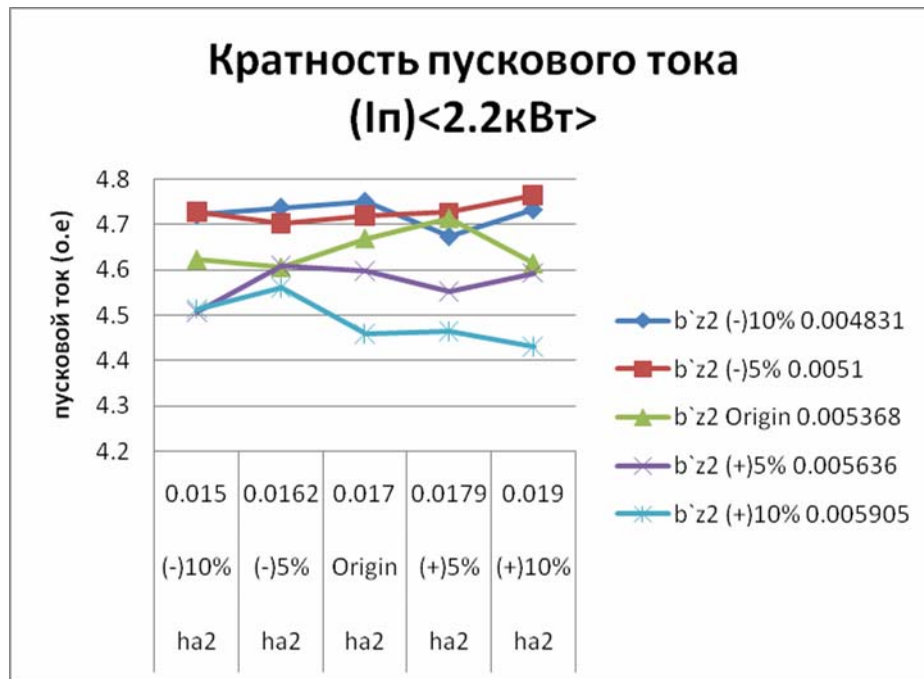


Рис.4.11. Сравнение кратность пускового тока (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.11(а и б) представлены графики зависимости изменения пускового тока . Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7,5кВт кратность пускового тока (I_p) уменьшается при уменьшении ширины зубца (b_{z2}) и при увеличении высоты ярма ротора (h_{a2}).
- у двигатель мощностью 2,2кВт максимальная кратность пускового тока (I_p) при уменьшении зубца ротора (b_{z2}) на 10% и при оригинальной высоте ярма ротора (h_{a2}).

4.6. Выбор оптимальных чисел витков и длины пакета статора

Здесь рассматривается возможность создания энергоэффективных АД путем изменения длины сердечника статора (L), числа витков в фазе обмотки статора и диаметры провода [68]. Диаметры сечения магнитопровода оставались неизменными. Значение длины сердечника статора для расчетов принимались

диапазоне $L=90-110\%$ от базовой вариантов. Диапазон изменения витков обмотки статора принимался равным $W=90-110\%$. У базовой двигателя $P_2=7.5$ кВт $W=168$, КПД= 0.83, у базовой двигателя $P_2=2.2$ кВт $W=240$, КПД= 0.8.

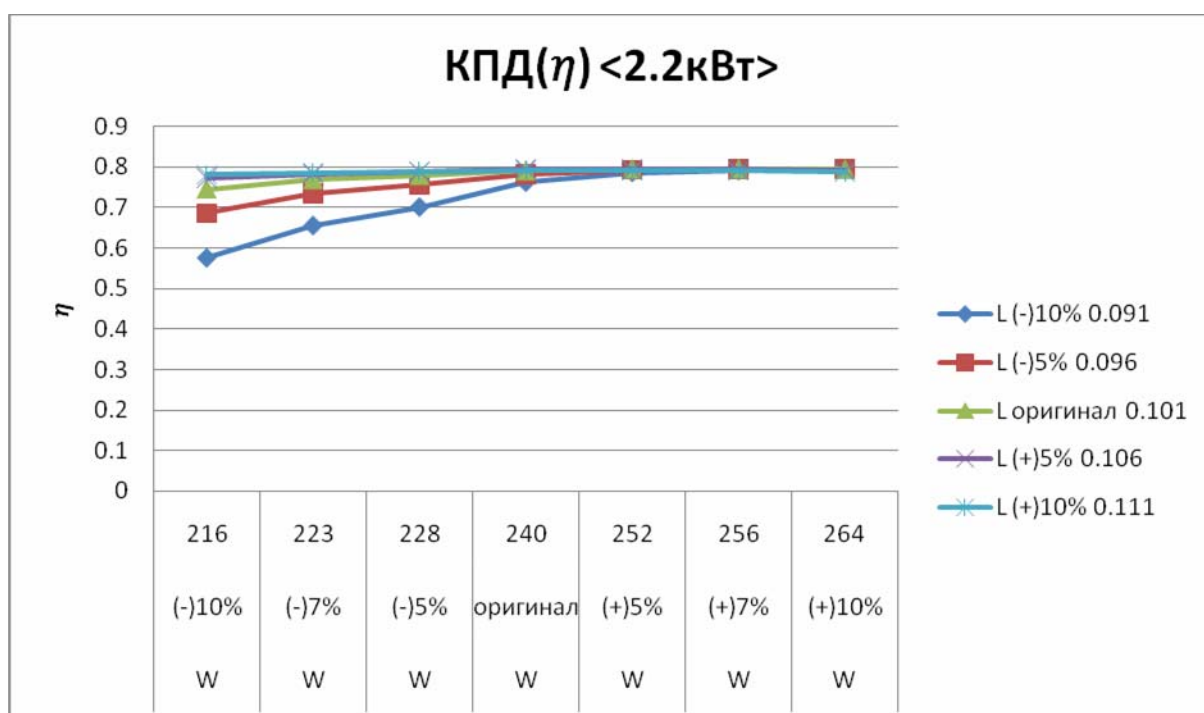
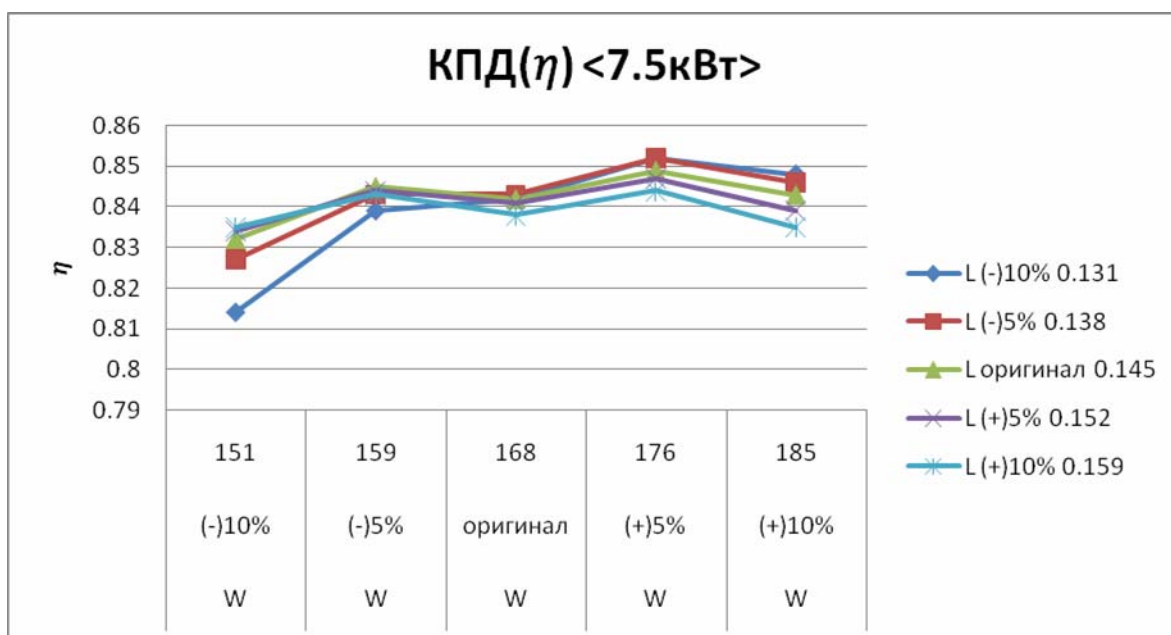
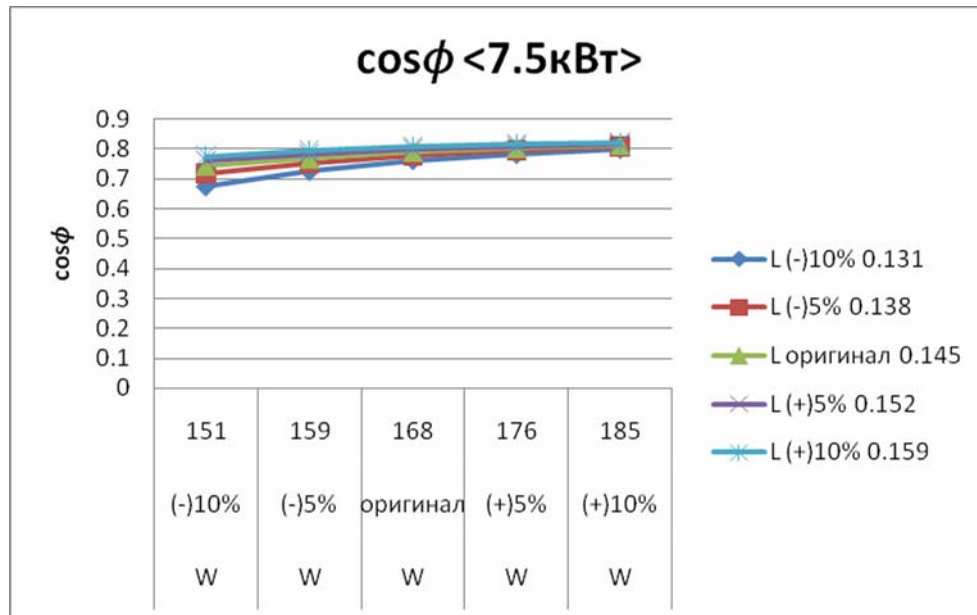


Рис.4.12. Сравнение КПД (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.12(а и б) представлены графики зависимости изменения КПД. Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7.5кВт - имеет максимальный КПД при уменьшении длины статора (l_s) на 5% и при увеличении числа витков статора (W_s) на 5%. $\max \eta = 0.85$.
- у двигателя мощностью 2.2кВт - имеет максимальный КПД при увеличении числа витков статора (W_s).



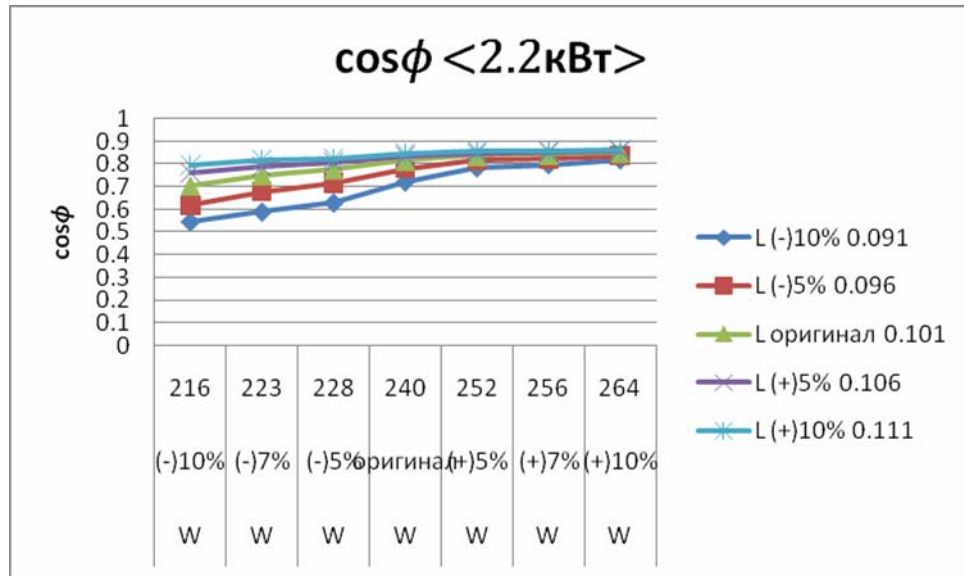
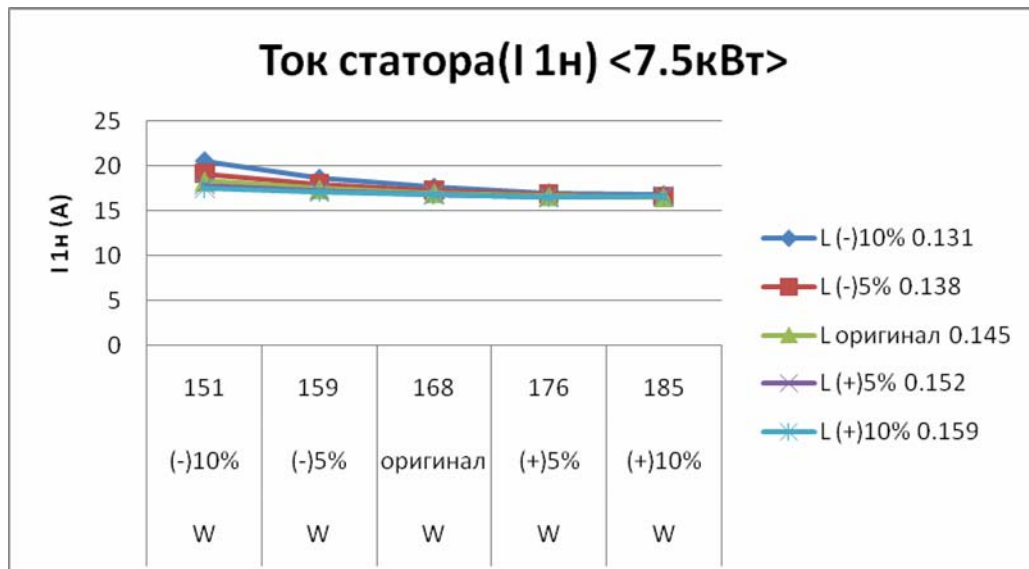


Рис.(4.13). Сравнение $\cos\phi$ (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.13(а и б) представлены графики зависимости изменения $\cos\phi$. Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7.5кВт при увеличении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s), $\cos\phi$ увеличивается .
- у двигатель мощностью 2.2кВт $\cos\phi$ увеличивается так же как и двигатель мощностью 7.5 кВт.



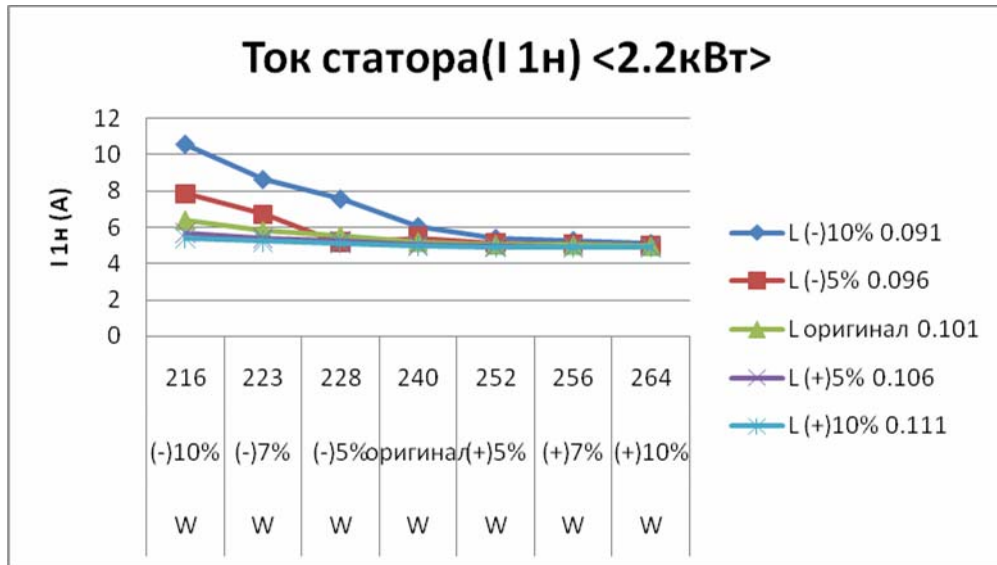
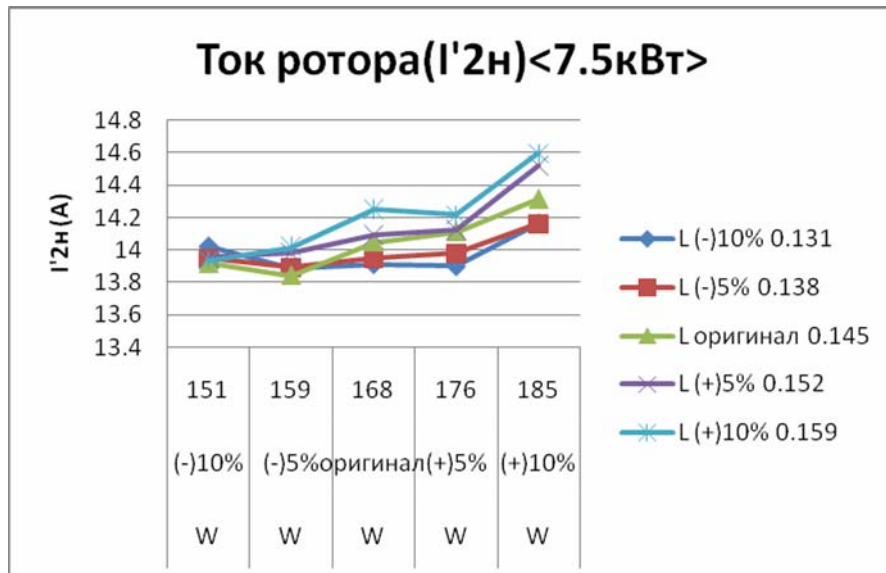


Рис.4.14. Сравнение I_1 (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.14 (а и б) представлены графики зависимости изменения тока статора. Анализ этих кривых показывает

- у двигатель мощностью 7.5кВт при увеличении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s), ток статора (I_1) уменьшается.
- у двигатель мощностью 2.2кВт при увеличении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s), ток статора (I_1) уменьшается.



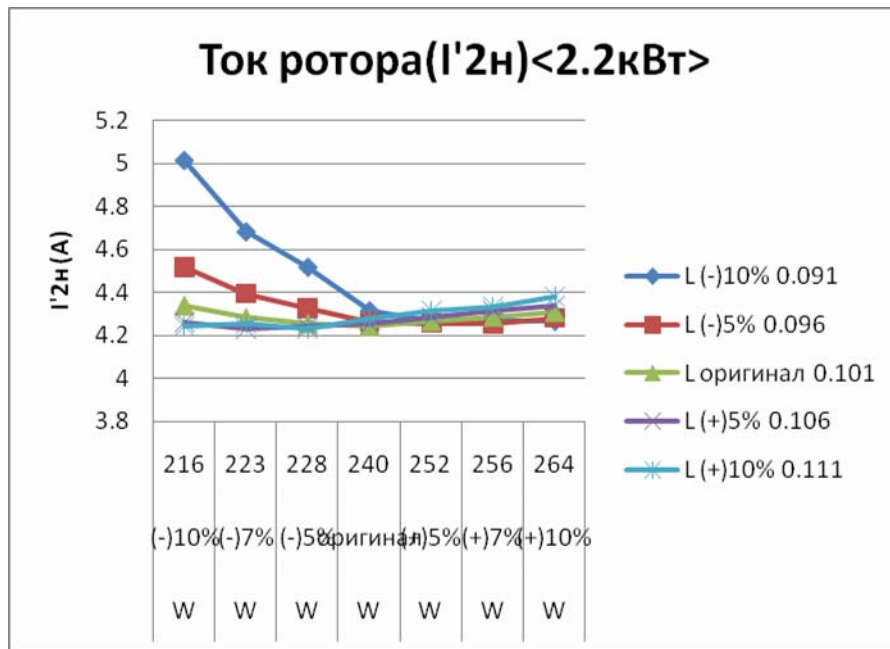


Рис.4.15. Сравнение I_2 (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.15(а и б) представлены графики зависимости изменения тока статора. Анализ этих кривых показывает

- у двигателя мощностью 7.5кВт при увеличении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s), ток ротора (I_2) увеличивается.
- у двигателя мощностью 2.2кВт ток ротора (I_2) уменьшается при увеличении длины статора (l_s), но с 5% увеличением длины снова увеличивается, и уменьшается при увеличении числа витков (W_s), но с 5% увеличением опять увеличивается как видно на рисунке.

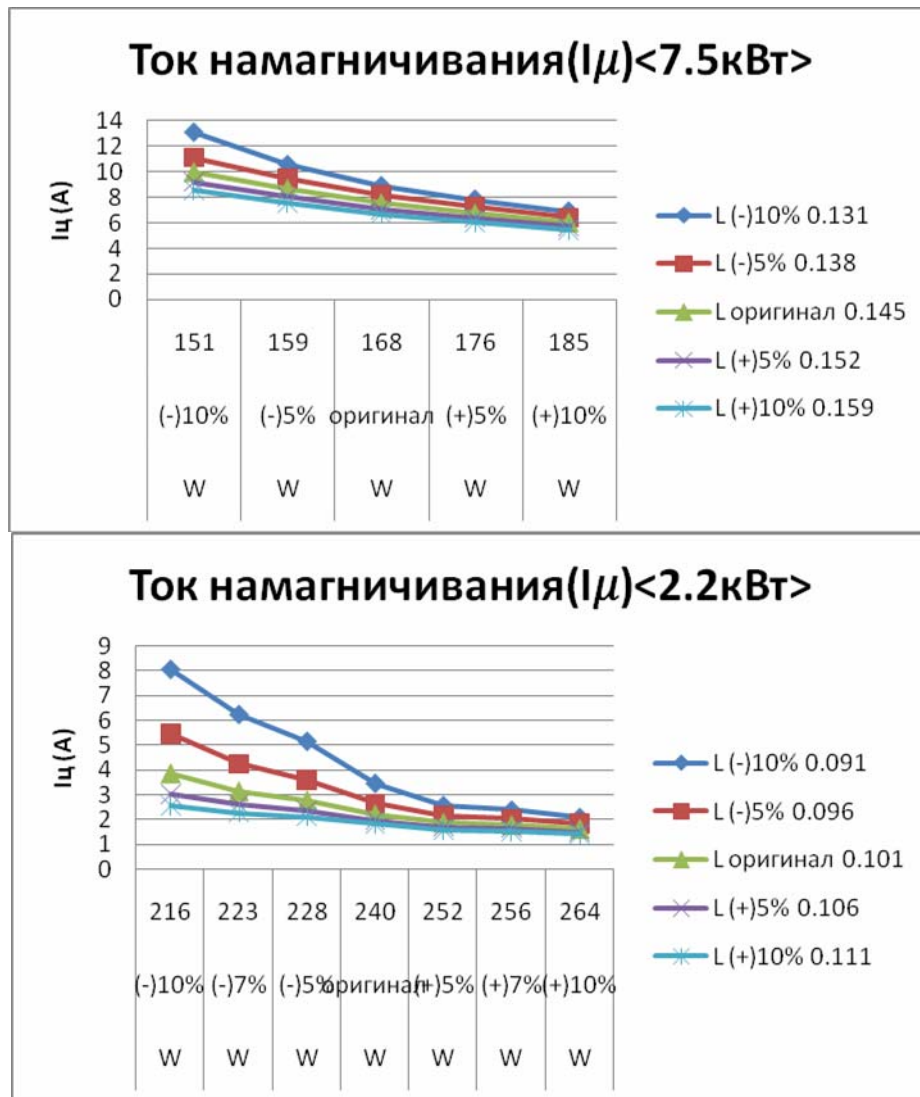


Рис.(4.16). Сравнение I_μ (а) 7,5 кВт (б) 2,2 кВт

На рисунках 4.16(а и б) представлены графики зависимости изменения тока намагничивания. Анализ этих кривых показывает что

- у двигателя мощностью 7.5кВт ток намагничивания (I_μ) уменьшается при увеличении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s).
- у двигателя мощностью 2.2кВт ток ротора (I_μ) уменьшается так же как у двигателя мощностью 7.5кВт.

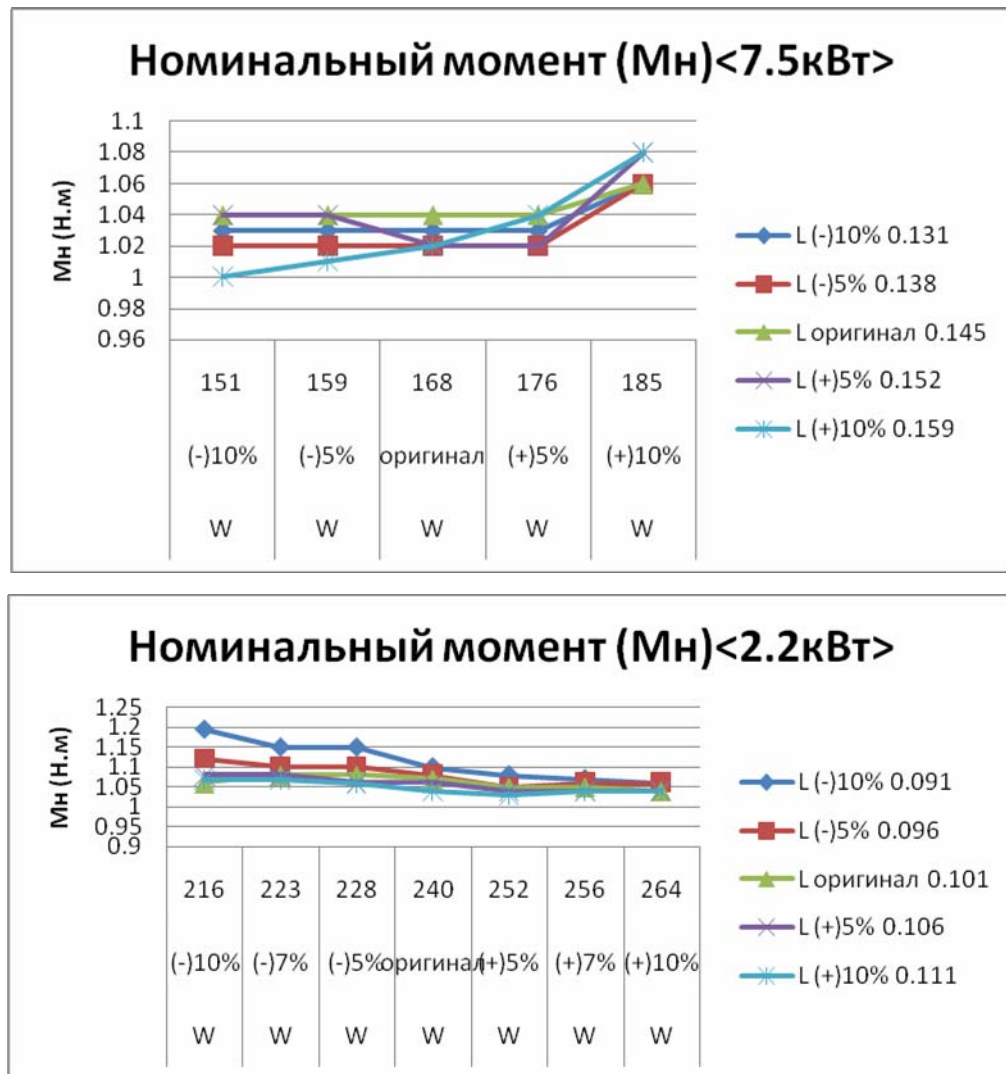


Рис.4.17. Сравнение M_n (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.17(а и б) представлены графики зависимости изменения номинального момента . Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7.5кВт имеет самый высокий номинальный момент (M_n) при увеличении длины статора (l_s) на 10% и при увеличении числа витков статора (W_s) на 10%.
- у двигатель мощностью 2.2кВт имеет самый высокий номинальный момент (M_n) при уменьшении длины статора (l_s) на 10% и при уменьшении числа витков статора (W_s) на 10%.

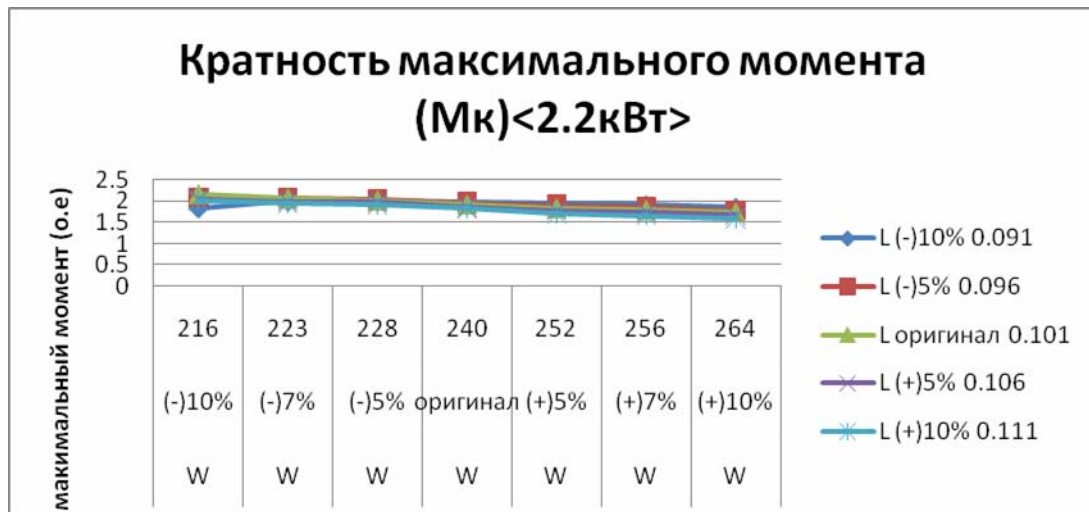
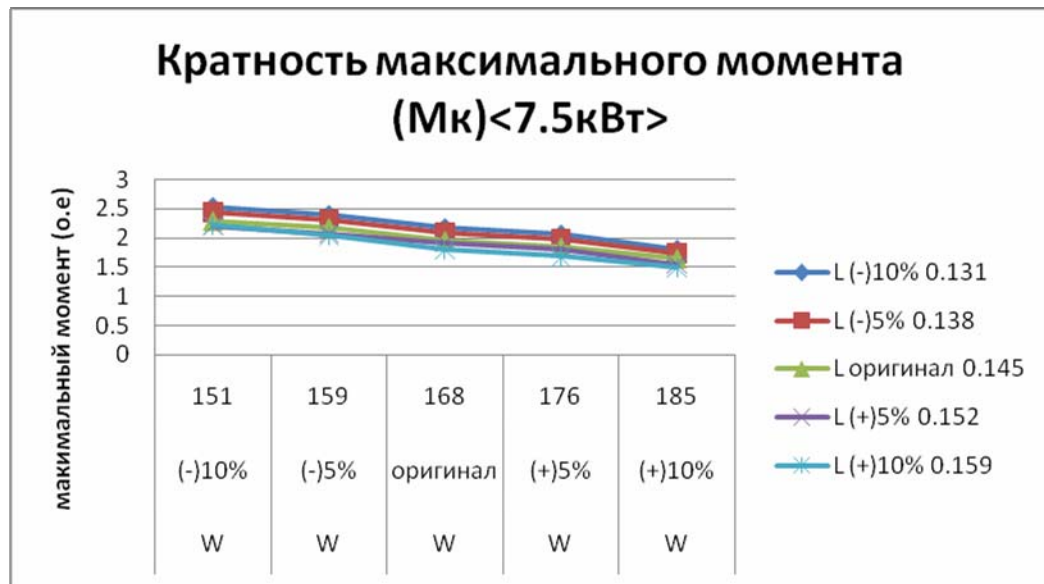


Рис.4.18. Сравнение кратность максимального момента (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках 4.18(а и б) представлены графики зависимости изменения кратности максимального момента . Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7.5кВт кратность максимального момента (M_K) уменьшается при уменьшении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s).
- у двигатель мощностью 2.2кВт кратность максимального момента (M_K) уменьшается при уменьшении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s).

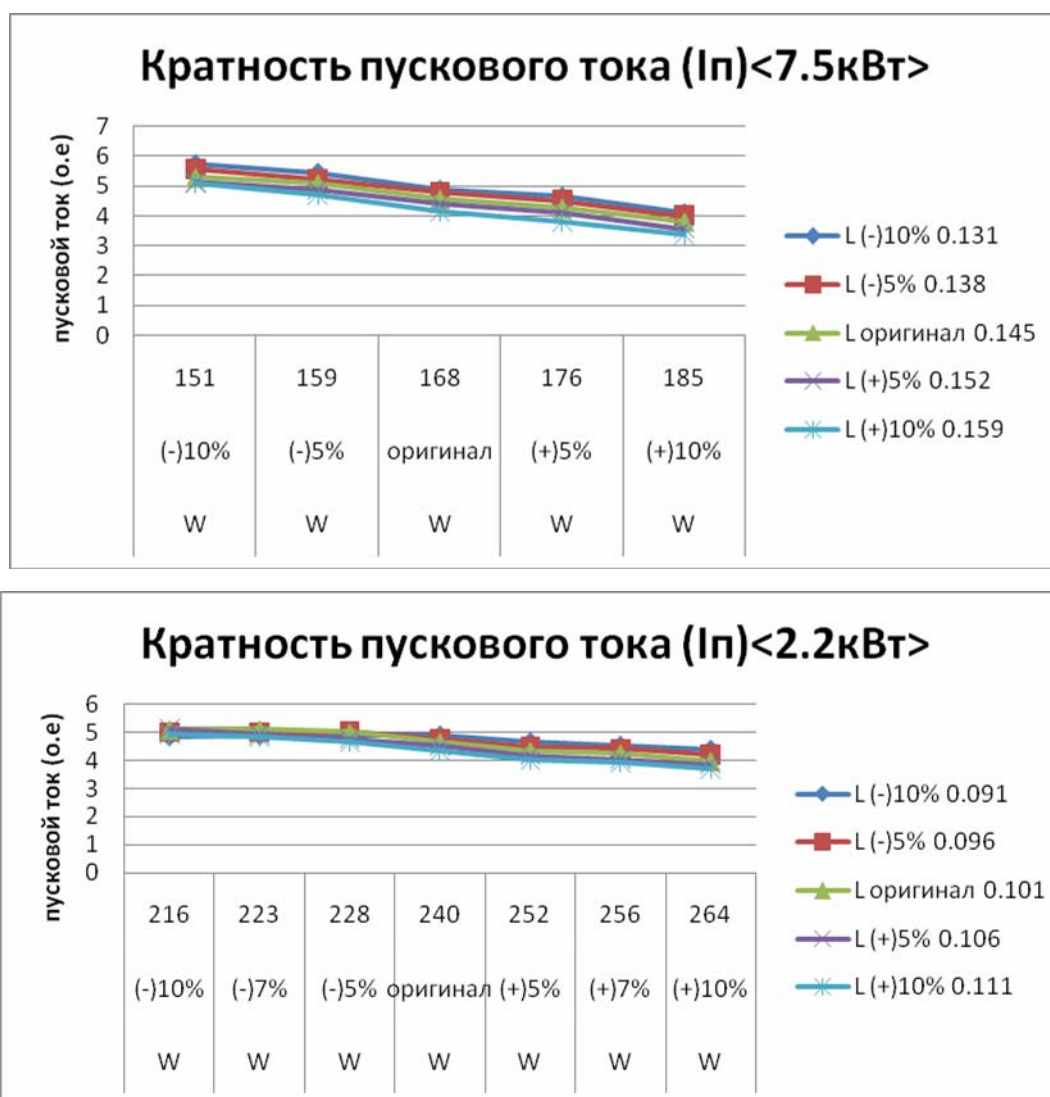


Рис.(4.19). Сравнение кратность пускового тока (а)7,5 кВт (б)2,2 кВт

На рисунках х10(а и б) представлены графики зависимости изменения кратности пускового тока . Анализ этих кривых показывает что

- у двигатель мощностью 7.5кВт кратность пускового тока (I_p) уменьшается при уменьшении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s).
- у двигатель мощностью 2.2кВт кратность пускового тока (I_p) уменьшается при уменьшении длины статора (l_s) и при увеличении числа витков статора (W_s).

На основе приведенных теоретических исследований по определению оптимальных параметров частотно-регулируемого АД и разработанной методики проектирования составлен программный комплекс для проведения расчетов на ЭВМ[57]. Блок схема программа представлен на рис 4.20.

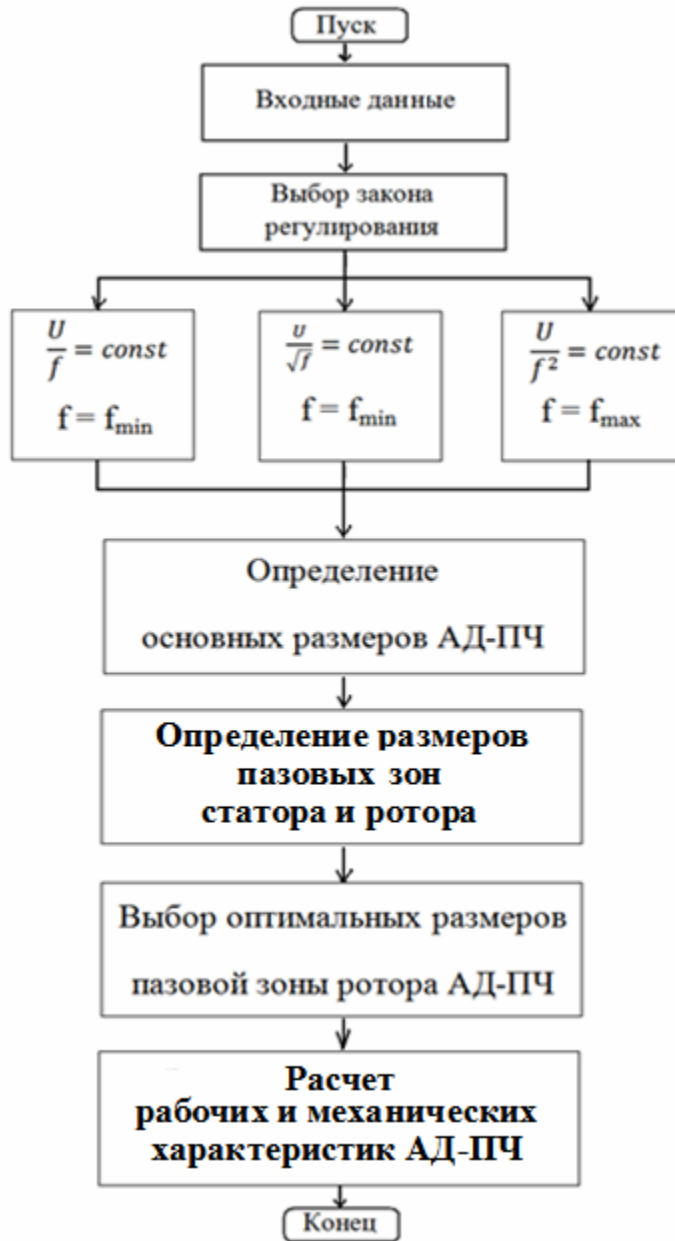


рис. 4.20. Блок схема программа расчета

4.7. Асинхронные частотно-регулируемые двигатели с медной клеткой

Еще одно направление повышения эффективности АД в 2001 г. предложили специалисты УкрВНИИВЭ (г. Донецк), которые совместно с Первомайским электромеханическим заводом освоили технологию изготовления медных литых короткозамкнутых обмоток ротором АД мощностью от 1,1 до 400 кВт. В серии взрывозащищенных АД, разработанной украинскими предприятиями, обеспечиваются уровни КПД EFF1 и EFF2 по нормам ЕС ЕРАСТ и ГОСТ Р 51677-2000.

Оборудование и технология производства медных литых обмоток короткозамкнутых роторов созданы и используются также в Германии и США.

Специальный сплав на основе меди с высокими литейными и механическими свойствами при температуре 1100°C заливается под давлением в пазы ротора. Т.к. электропроводность меди на 67% выше, чем у алюминия, снижаются критически и рабочее скольжение и потери в роторе, на 1.5-3% увеличивается КПД и в 1,5 раза перегрузочная способность (рис. 2), на 20 дБ (А) уменьшается звуковое давление, повышается надежность. Расчеты показывают на таблице 4.1 что, температура снижается 14-19%.

Поэтому представляет интерес рассмотреть применения медных короткозамкнутых обмоток ротора для частотно-регулируемых АД. Для повышения точности расчетов учитывалось эффект вытеснения токов ротора т.е. расчет рабочих и пусковой характеристик проводился с учетом изменения параметров ротора. Активное и индуктивное сопротивление ротора определялись с помощью коэффициентов K_r и K_x т.е. $R'_2 = R_{2н} \cdot K_r$ а также $X'_2 = X_{2н} \cdot K_x$. Графики зависимостей K_r и K_x от частоты токов в роторе приведены на рис. 4.21[32].

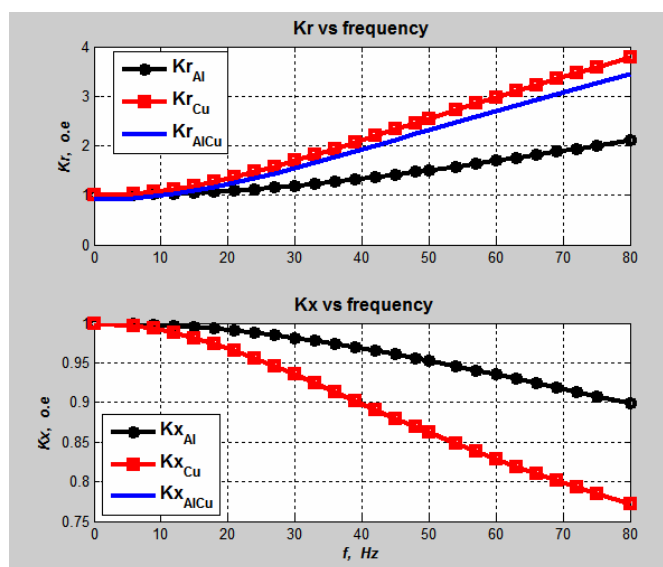


рис 4.21 Графики зависимостей K_r и K_x от частоты токов в роторе

В таблице 4.2 представлены результаты расчета АД мощностью 2.2 кВт и 7.5 кВт с медными и алюминиями обмотками ротора.

Таблица 4.2.

Параметры	Мощность	алюминий	медь	Разница
КПД(%)	2,2кВт	79,2	81,7	+3,06(%)
	7,5кВт	84,1	85,9	+2,1(%)
Cos (\square)	2,2кВт	0,82	0,81	-1,23(%)
	7,5кВт	0,795	0,792	-0,38(%)
Потерь(кВт)	2,2кВт	0,555	0,492	-12,8(%)
	7,5кВт	1,418	1,232	-15,1(%)
Ток статора(А)	2,2кВт	5,127	5,04	-1,73(%)
	7,5кВт	17,008	16,677	-1,98(%)

Скольжение(о.е)	2,2кВт	0,048	0,026	-0,022
	7,5кВт	0,0358	0,0174	-0,0184
Номинальный момент(Н.м)	2,2кВт	1	0,96	-4,17(%)
	7,5кВт	1,05	0,97	-8,25(%)
Кратность пускового момента (о.е)	2,2кВт	1,401	0,944	-0,457
	7,5кВт	1,15	0,724	-0,426
Кратность максимального момента (о.е)	2,2кВт	1,554	2,155	0,601
	7,5кВт	1,916	2,106	0,19
Температура(°C)	2,2кВт	72,275	62,861	-14,98(%)
	7,5кВт	100,867	84,47	-19,41(%)

Результаты расчетов показывают что при применении медной кладки КПД увеличивается 2-3% по сравнению с двигателем с клеткой из алюминий. Это связано с тем, что электрические потери уменьшаются на 12-15%.

Рассмотренные примеры показывают высокую техническую и экономическую эффективность электродвигателей переменного тока, специально спроектированных и изготовленных для работы от вентильных преобразователей частоты.

Выводы по главе 4.

1. Разработана инженерная методика определения главных размеров, которая позволяет определить основные размеры и характеристики для заданного закона регулирования.
2. Произведенные результаты модернизации АД показывают, что оптимальные варианты обеспечения энергетических показателей могут быть достигнуты путем изменения размеров пазовой зоны ротора, либо изменением длины статора и числа витков статора.
3. Улучшение энергетических показателей АД может быть достигнуто также путем замены алюминиевой клетки на медную.