

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН

А. М. Галиновский, к.т.н., доц., В. А. Бобер, инж. 1-й кат.,

А. Н. Давыдов, к.т.н., доц., А. С. Вишневский, студ.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина

E-mail: ntuukafem@ua.fm

Приведены уточненная схема замещения асинхронной машины с фазным ротором, особенности методики проектирования основной электрической машины асинхронизированного комплекса в режимах генератора и двигателя.

Ключевые слова: асинхронизированная, синхронная, асинхронная, схема замещения.

Введение. Асинхронизированная машина (АСМ) – это электромеханический комплекс, состоящий из основной электрической машины, преобразователя частоты (ПЧ) и устройств автоматического регулирования, контроля и защиты [1, 3, 7].

Основная электрическая машина – асинхронная машина с фазным ротором, обмотка статора которой подключена к сети, а обмотка ротора к выходу ПЧ.

Технико-экономические показатели АСМ во многом зависят от согласования параметров составных частей.

Анализ предыдущих исследований. В работах [1, 3, 5–12] приводится анализ АСМ в контактном и бесконтактном исполнении при разных режимах работы. Применяются разные названия одной и той же машины (АСМ): машина двойного питания; асинхронизированная синхронная машина и др. В работах [10, 11] применяются сокращенные обозначения машин и комплексов:

АСМ, АСГ, АСД – асинхронизированная машина, генератор, двигатель соответственно;

БАСМ, БАСГ, БАСД – бесконтактная асинхронизированная машина, генератор, двигатель;

АМ – основная электрическая машина;

АГ, АД – АМ в режимах генератора и двигателя.

Указанные обозначения применяем и в настоящей работе. Отметим, что термин «основная электрическая машина асинхронизированной машины» не созвучен в русском языке. Поэтому заменяем его термином «основная электрическая машина асинхронизированного комплекса».

В работах [8–11] показано, что возбудители БАСМ целесообразно строить на базе непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией (НПЧЕ) при комбинированном потенциальном разделении обмоток источника и комбинированном законе управления. При этом применяются простые устройства передачи сигналов управления на вращающиеся тиристоры. Однако НПЧЕ не могут обеспечить высокое качество формы напряжения при инфранизких частотах нагрузки [8, 10, 11]. В этих случаях следует применять каскадные возбудители с НПЧЕ при модулированном напряжении. В НПЧЕ при циклическом алгоритме управления возможна передача активной мощности только от преобразователя к нагрузке. Это необходимо учитывать при разработке БАСМ.

Ускоренное внедрение БАСМ возможно при применении бесконтактных пусковых устройств [5].

В работе [12] показаны особенности разработки асинхронизированных стартер-генераторов газотурбинных агрегатов газоперекачивающих станций. Показана возможность уменьшения (до 30 %) мощности реверсивного ПЧ при корректировке рабочего диапазона скольжения АГ, которая достигается изменением передаточного числа редуктора.

Работа [6] посвящена созданию АСД водонасосного агрегата с обеспечением стартерного режима при применении неререверсивного ПЧ.

Вопросам проектирования асинхронных машин с фазным ротором уделено много внимания в технической литературе [2, 4], в которой отражен значительный опыт ведущих специалистов мирового электромашиностроения. Однако сравнительно мало внимания уделяется проектированию АМ в составе АСМ и (особенно) БАСМ. В то же время следующие факторы необходимо учитывать при разработке АМ и АСМ в целом:

разработка опытно-промышленных образцов АМ проводится на базе существующей технологии производства с применением имеющихся штампов вырубки листов электротехнической стали и другого оборудования;

с изменением режимов работы АМ существенно изменяются насыщение магнитной цепи, основные, поверхностные и пульсационные потери в стали;

в разработке АСМ принимают участие специалисты по электромеханике, преобразовательной технике, энергосбережению и другим направлениям, между которыми проводится оперативный обмен информацией.

Информация по АМ может быть выдана в виде параметров уточненной схемы замещения. Оперативный учет текущих изменений параметров составных частей АСМ при разработке требует применения автоматизированной методики проектирования АМ. Актуальным является совершенствование методики проектирования АСМ.

Цель работы. Совершенствование методики проектирования основной электрической машины асинхронизированного комплекса в режимах генератора и двигателя.

Материал и результаты исследования. Схема замещения АМ показана на рис. 1, а.

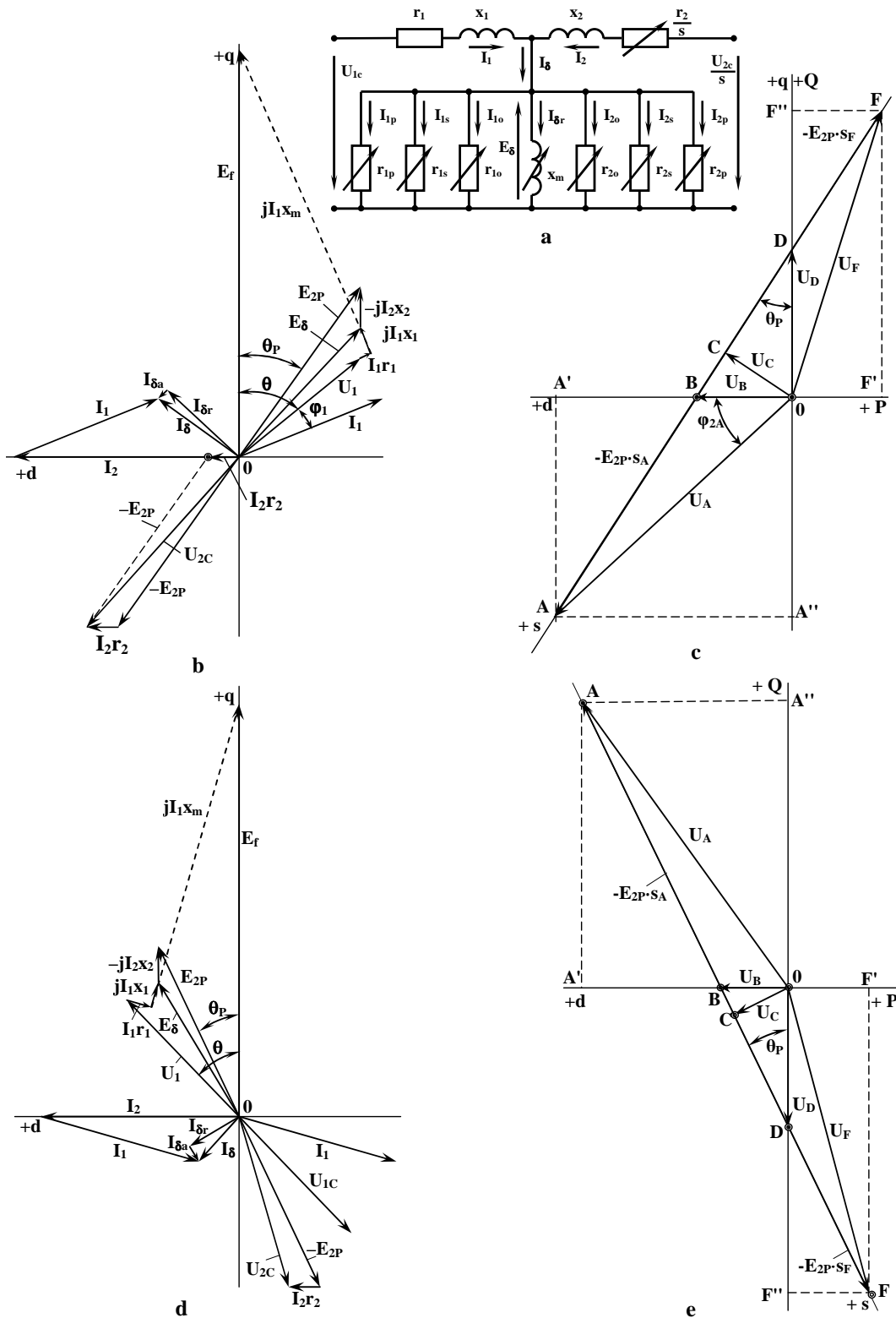


Рисунок 1 – Схема замещения (а) и векторные диаграммы АМ в режимах: b, с – генератора; d, е – двигателя

На рисунке введены следующие обозначения: U_{1c} , I_1 , U_{2c} , I_2 – напряжения и токи первичной и вторичной сетей; r_1 , x_1 , r_2 , x_2 – активные сопротивления и сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора; s – скольжение; x_m – индуктивное сопротивление намагничивающего контура; E_δ – результирующая ЭДС воздушного зазора. Активные сопротивления намагничивающего контура:

$$\begin{aligned}
 r_{1o} &= r_{1o50} \cdot (50/f_1)^\beta; & r_{2o} &= r_{2o50} \cdot (50/f_2)^\beta; \\
 r_{1s} &= r_{1s50} \cdot (50/f_b)^{1.5}; & r_{2s} &= r_{2s50} \cdot (50/f_b)^{1.5}; \\
 r_{1p} &= r_{1p50} \cdot (50/f_b)^2; & r_{2p} &= r_{2p50} \cdot (50/f_b)^2.
 \end{aligned}$$

Первые нижние индексы присвоены величинам сопротивлений (токов) статора («1») и ротора («2»). Вторые нижние индексы присвоены величинам, соответствующим потерям в стали: «o» – основные;

«с» – поверхностные; «р» – пульсационные. Величины $r_{1o50}, r_{2o50}, r_{1s50}, r_{2s50}, r_{1p50}, r_{2p50}$ – сопротивления намагничивающего контура при частотах $f_1 = f_2 = 50$ Гц, f_b – частота вращения вала АМ, β – показатель степени, зависящий от марки и толщины листов стали магнитопровода. $I_\delta, I_{\delta r}, I_{1o}, I_{1s}, I_{1p}, I_{2o}, I_{2s}, I_{2p}$ – полный, реактивный и активные составляющие тока намагничивающего контура.

Параметры ротора приведены к статору.

Уравнения напряжений и намагничивающих сил АМ:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1c} + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 r_1 = 0; \\ \frac{\dot{U}_{2c}}{s} + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} = 0; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_\delta. \end{cases} \quad (1)$$

Векторные диаграммы напряжений и намагничивающих сил (НС) АМ показаны на рис. 1: б, с) АГ; д, е) АД; б, д) $s=1=\text{const}$; с, е) $s=\text{var}$.

Диаграммы напряжений и НС АМ при $s=1$ подобны диаграммам трансформаторов при передаче активной мощности в первичную или вторичную сеть.

Определим напряжение U_{2c} , ток I_2 , $\cos\varphi_2$, активную, реактивную и полную мощности (P_2, Q_2 и S_2) ротора АГ в зависимости от скольжения при постоянной номинальной нагрузке: $U_{1c}=\text{const}, I_1=I_{1N}=\text{const}, \varphi_1=\varphi_{1N}=\text{const}, f_1=f_{1N}=\text{const}$. Известны величины r_1, x_1, r_2, x_2 , тип стали, кривая намагничивания машины. При заданной величине s известны активные сопротивления намагничивающего контура.

Из первого уравнения (1) $\dot{E}_\delta = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$, где $U_1 = -U_{1c}$. По кривой намагничивания определяем $I_{\delta r}$. $\dot{I}_\delta = \dot{I}_{\delta r} + \dot{I}_{\delta a}$, где $\dot{I}_{\delta a} = \dot{I}_{1o} + \dot{I}_{1s} + \dot{I}_{1p} + \dot{I}_{2o} + \dot{I}_{2s} + \dot{I}_{2p}$. Ток ротора $\dot{I}_2 = \dot{I}_\delta - \dot{I}_1$. При $I_1 = \text{const}$: $I_\delta = \text{const}$; $I_2 = \text{const}$.

Из второго уравнения (1)

$$\dot{U}_{2c} = \dot{I}_2 r_2 - \dot{E}_{2p} \cdot s,$$

где $\dot{E}_{2p} = \dot{E}_\delta - j\dot{I}_2 x_2$ – результирующая ЭДС обмотки ротора.

При $s=0$ $U_{2c} = I_2 \cdot r_2$ (точка В на рис. 1, с).

При изменении s конец вектора U_{2c} скользит по линии напряжений АФ, проведенной через точку В параллельно вектору \dot{E}_{2p} . Для любой точки на линии АФ величина U_{2c} пропорциональна расстоянию к точке О. Для заданной величины s конец вектора U_{2c} удален от точки В на расстояние $|\dot{E}_{2p} \cdot s|$.

Обозначениям величин напряжений, мощностей, скольжений присвоим нижний индекс с названием точки на линии АФ. В точке В: $s_B = 0$; $U_{2B} = I_2 \cdot r_2$; $Q_{2B} = 0$. В точке D: $s = s_D$; $P_{2D} = 0$.

Из заданной точки А на линии АФ проводим линии, перпендикулярные к осям d и q. Пересечения этих линий с осями d и q обозначены буквами А' и А''. Длины отрезков от точки О к точкам А' и А'' пропорциональны величинам активной и реактивной мощностей обмотки ротора.

На рис. 1, д, е показаны диаграммы напряжений и намагничивающих сил АД при $U_{1c} = \text{const}, I_1 = I_{1N} = \text{const}, \varphi_1 = \varphi_{1N} = \text{const}, f_1 = f_{1N} = \text{const}$. При указанных условиях расчет АД аналогичен расчету АГ.

В АГ:

при $\infty > s > s_d$ активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора;

при $s_d > s > (-)\infty$ – активная мощность передается с обмотки ротора через ПЧ в сеть.

В АД:

при $\infty > s > s_d$ активная мощность передается с обмотки ротора через ПЧ в сеть;

при $s_d > s > (-)\infty$ – активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора.

Исследуем АГ мощностью $P_{1N} = 630$ кВт, $U_{1N} = 400$ В, $\cos\varphi_{1N} = 0.8$, число пар полюсов $p=5$, номинальная скорость вращения $n_N = 630$ об/мин. Параметры схемы замещения: $r_1=2.64$ мОм; $r_2=2.6$ мОм; $x_1=19$ мОм; $x_2=40$ мОм. В номинальном режиме $r_m=4.3$ мОм, $x_m=0.49$ Ом, коэффициент насыщения $k_\mu=1.112$.

На рис. 2 показаны зависимости параметров вторичного контура АГ ($P_2, Q_2, S_2, U_{2c}, \varphi_2$) от скольжения.

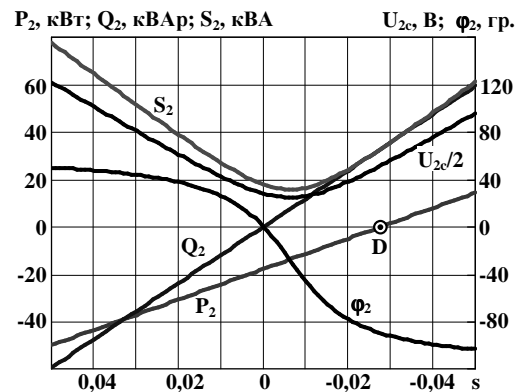


Рисунок 2 – Зависимости $P_2, Q_2, S_2, U_{2c}, \varphi_2$ от скольжения АГ мощностью $P=630$ кВт

Расчетная мощность ПЧ при скольжении $s=0.05$ $S_{2N} = 77.7$ кВА. Мощность ПЧ при скольжении $s = -0.05$ $S_2 = 61.1$ кВА.

Асинхронизированный двигатель водонасосного агрегата Д3200-55. Номинальная мощность АД $P_N=630$ кВт, $U=6$ кВ, $f_1=50$ Гц, $p=6$; $n_N=730$ об/мин. Номинальное скольжение $s = -0.46$. Закон автоматического регулирования: $\cos\varphi_{1N} = 0.95 = \text{const}$ (потребление реактивной мощности). Известна зависимость мощности на валу P_v от скорости вращения n при вентиляторной характеристике нагрузки.

Параметры схемы замещения: $r_1 = 1.25$ Ом; $x_1 = 5.6$ Ом; $r_2 = 1.182$ Ом; $x_2 = 9.226$ Ом; $r_{1o50} = 11.4$ кОм; $r_{2o50} = 10.9$ кОм; $r_{1s50} = 92.6$ кОм; $r_{2s50} = 59.8$ кОм; $r_{1p50} = 77.3$ кОм; $r_{2p50} = 20.3$ кОм. Задана кривая намагничивания. В номинальном режиме $x_m = 95.3$ Ом, коэффициент насыщения $k_\mu = 1.077$.

Алгоритм расчета АД по уточненной схеме замещения показан на рис. 3.

Задаемся массивом скорости вала n и мощности на валу P_B размером k_n . Определяем массивы предварительных величин активной мощности и тока статора АД ($P_{1П}, I_{1П}$), рассчитанные без учета потерь.

Для k -ой точки массива в блоке вычислений 5 по начальному значению тока $I_1 = I_{1Пk}$ определяем $\dot{I}_1, \dot{E}_\delta, x_m, \dot{I}_\delta, \dot{I}_2, \dot{E}_{2p}, \dot{U}_{2c}, P_1 = m \cdot U_{1c} \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1, P_2 = m \cdot U_{2c} \cdot I_2 \times \cos\phi_2, \Sigma p$. Определяем расчетную величину мощности на валу с учетом потерь: $P_{Bp} = P_1 + P_2 - \Sigma p$. Если погрешность $\varepsilon = |1 - P_{Bp}/P_B|$ больше заданной ε_z , то повторяем расчет с новым значением $I_1 = |I_1| \cdot P_B/P_{Bp}$.

В блоке вычислений 7 рассчитываем мощности вторичного контура АД и КПД.

На рис. 4 показана векторная диаграмма напряжений и НС АД при номинальном режиме работы. В верхней части 1-го квадранта диаграммы показано определение величины U_{2cN} .

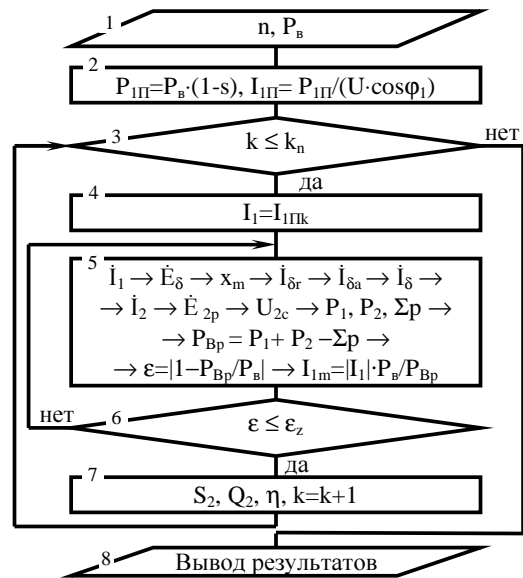


Рисунок 3 – Алгоритм расчета АД

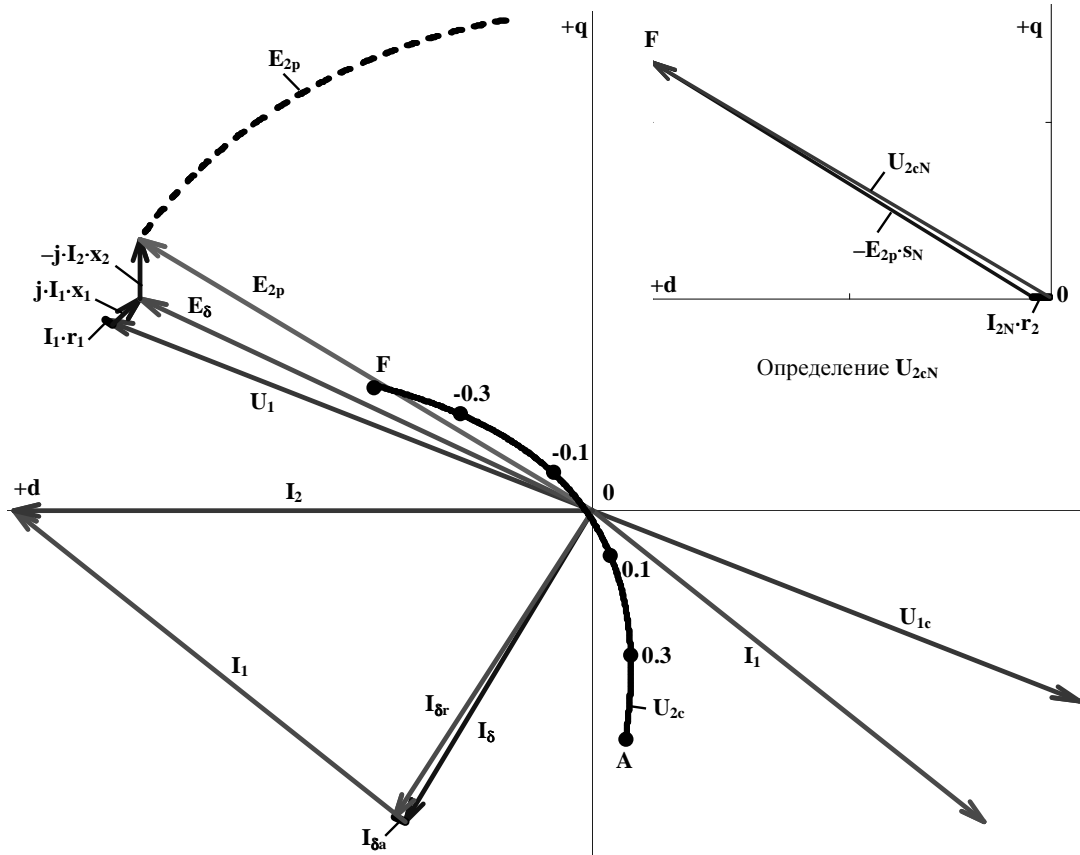


Рисунок 4 – Векторная диаграмма напряжений и токов АД-630

При изменении скольжения в диапазоне $s = -0.46 \div +0.46$ конец вектора напряжения U_{2c} скользит по линии напряжений AF , а конец вектора результирующей ЭДС ротора E_{2p} – по пунктирной линии E_{2p} .

На рис. 5 и 6 показаны расчетные величины АД с полуоткрытыми и открытыми пазами статора и ротора в зависимости от скольжения:

а) P_1, P_2, P_B, η – активные мощности статора и ротора, мощность на валу, КПД двигателя;

б) $S_2, Q_2, I_1, I_2, U_2, \cos\phi_2$ – полная и реактивная мощности ротора, токи статора и ротора, напряжение ротора, коэффициент мощности ротора;

в) $P_{10}, P_{1s}, P_{1p}, P_{20}, P_{2s}, P_{2p}$ – основные, поверхностные, пульсационные потери статора и ротора;

д) $P_{e1}, P_{e2}, P_{ст}, P_{мех}, P_{доб}, P_{\Sigma}$ – потери электрические статора и ротора, потери в стали, механические потери, добавочные и суммарные потери.

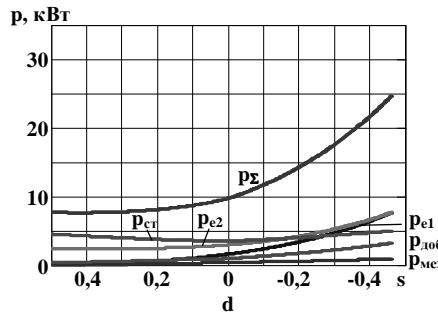
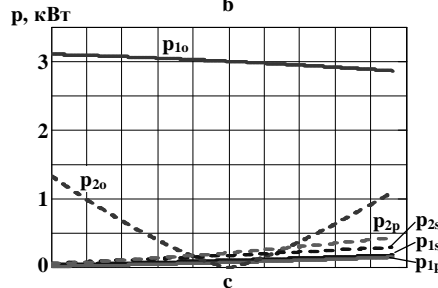
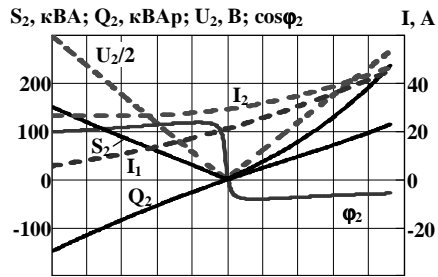
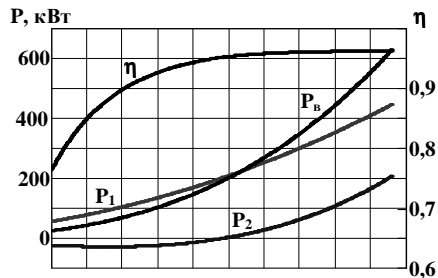


Рисунок 5 – Расчетные величины АД-630 с полукрытыми пазами статора и ротора в зависимости от скольжения

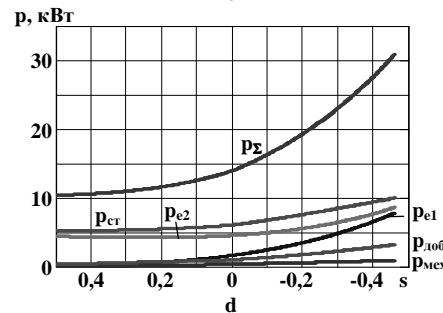
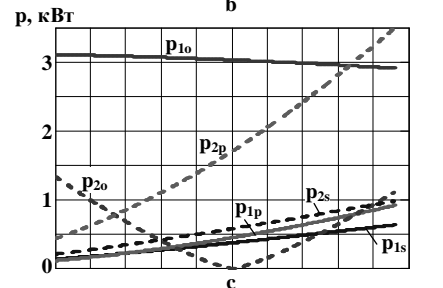
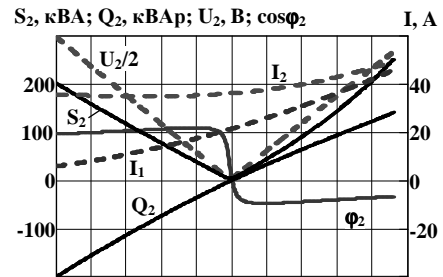
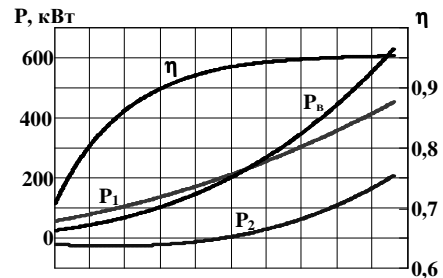


Рисунок 6 – Расчетные величины АД-630 с открытыми пазами статора и ротора в зависимости от скольжения

Как видно из рисунков, при открытых пазах на статоре и роторе с увеличением скорости вращения существенно увеличиваются пульсационные потери ротора, при $s = s_N = -0.46$ $p_{2p} > p_{10}$.

Таблица 1 – Расчетные величины АД-630 с открытыми и полукрытыми пазами при $n=730$ об/мин

Величины Тип паза	1	P_B , кВт	P_1 , кВт	P_2 , кВт	η	I_1 , А	I_2 , А	U_2 , В	Q_2 , кВАр	S_2 , кВА	φ_2 , гр.
полукрытый	2	630	447,2	207,6	0,962	45,3	46,8	533,4	114,8	237,2	-28,9
открытый	3	630	452,4	208,5	0,953	45,8	49,5	534,6	140,7	251,5	-34

1	$p_{мех}$, Вт	$p_{о1}$, Вт	$p_{с1}$, Вт	$p_{р1}$, Вт	$p_{о2}$, Вт	$p_{с2}$, Вт	$p_{р2}$, Вт	$p_{ст}$, Вт	p_{e11} , Вт	p_{e12} , Вт	p_d , Вт	p_{Σ} , кВт
2	979	2867	180	151	1099	297	441	5035	7700	7764	3274	24,8
3	979	2916	636	920	1118	984	3506	10079	7880	8691	3305	30,9

Как следует из данных табл. 1, замена полукрытых пазов статора и ротора АД открытыми пазами приводит к увеличению:

пульсационных потерь в стали ротора в 8 раз;
пульсационных потерь в стали статора в 6 раз;
поверхностных потерь в стали ротора в 3.3 раза;

поверхностных потерь в стали статора в 3.5 раза; суммарных потерь в стали в 2 раза.

КПД машины снижается ~ на 1 %.

Применение открытых пазов в АМ средней и большой мощности приводит к существенному увеличению потерь в стали. Поэтому в таких АМ при существенном изменении скольжения рекомендуется применение только полуоткрытых пазов.

Выводы. 1. Разработанная методика автоматизированного электромагнитного расчета основной электрической машины (АМ) асинхронизированного комплекса позволяет на стадии проектирования оптимизировать параметры АМ (геометрия, потери, диапазон изменения скольжения) с учетом выходных параметров преобразователей частоты (величина и направление передачи активной мощности). Методика расчета может быть применена при разработке генераторов, двигателей, компенсаторов, стартер-генераторных и других комплексов АСМ в контактном и бесконтактном исполнении.

2. Изменение режима работы АМ может существенно повлиять на изменение результирующих и локальных потерь машины, поэтому уточненный учет потерь в АМ обязателен.

3. Целесообразно параметры уточненной схемы замещения АМ ввести в каталожные данные машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. – М.: Наука, 1969. – 140 с.
2. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – К.: Гостехиздат УССР, 1960. – 912 с.
3. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
4. Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
5. Галиновский А.М., Анпилогов Н.Г., Ленская Е.А. Пуск бесконтактного асинхронизированного двигателя по методу противовключения обмоток ротора / Сб. научных трудов ДонГТУ, Алчевск, 2006. – С. 260–270.

6. Галиновский А.М., Бобер В.А., Троян А.И., Ленская Е.А. Режимы работы водонасосной станции и выбор регулируемого электропривода / Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 124–134.

7. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.

8. Галиновский А.М., Кузьминский Е.В., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи бесконтактных асинхронизированных машин с синхронными возбудителями / Вісник Кременчуцького держ. університету ім. Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 3, ч. 2. – С. 46–50.

9. Сенько В.И., Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазно-трехфазные мостовые преобразователи частоты бесконтактных асинхронизированных машин / Вісник Кременчуцького держ. університету ім. Михайла Остроградського. – № 4/2010 (63), ч. 3. – С. 69–73.

10. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 1) / Гірнична електромеханіка та автоматика. Наук.-техн. зб. – 2010, № 84. – С. 218–227.

11. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 2) / Гірнична електромеханіка та автоматика. – Наук.-техн. зб. – 2010, № 85. – С. 159–169.

12. Вареник Е.А., Галиновский А.М., Когут В.В., Красников Г.В. Асинхронизированные стартер-генераторы газотурбинных агрегатов и газотурбинных установок / Сборник научных трудов УкрНИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование» – Донецк: Юго-Восток, 2011. – С. 157–167.

Стаття надійшла 29.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Прусом В.В.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОНІЗОВАНИХ МАШИН

О. М. Галіновський, к.т.н., доц., В. А. Бобер, інж. 1-й кат.,

О. М. Давидов, к.т.н., доц., А. С. Вишневський, студ.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна

E-mail: ntuukafem@ua.fm

Приведені уточнена схема заміщення асинхронної машини з фазним ротором, особливості методики проектування основної електричної машини асинхронізованого комплексу в режимах генератора та двигуна.

Ключові слова: асинхронізована, синхронна, асинхронна, схема заміщення.

DESIGN FEATURES OF ASYNCHRONIZED ELECTRIC MACHINES

A. Galinovskiy, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., V. Bober, eng.,

A. Davydov, Cand.Sc. (Eng.), A. Vishnevskiy, stud.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute»

prosp. Pobedy, 37, 03056, Kyiv, Ukraine

E-mail: ntuukafem@ua.fm

Resulted the specified chart of substituting for an asynchronous machine with a phase rotor, features of design technique basic electric machine of asynchronous complex in the modes of generator and engine.

Key words: asynchronous, synchronous, asynchronous, substitution scheme.