

Оценка эффективности классических законов управления частотно-регулируемых асинхронных двигателей

СОКОЛОВА Е.М., МОЩИНСКИЙ Ю.А.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод занимает доминирующее положение среди регулируемых электроприводов. Поэтому важно рассмотреть рациональные способы управления асинхронными двигателями (АД) с точки зрения уменьшения энергопотребления. Таких способов управления два: по закону пропорционального регулирования частоты и напряжения на входе двигателя и по законам, обеспечивающим поддержание постоянства полных потокосцеплений статора, ротора и главного потокосцепления в воздушном зазоре. В статье предложена методика расчета энергетических показателей частотно-регулируемого АД для этих законов управления, которая позволяет сравнительно просто без итераций рассчитывать и проводить их сравнение. Расчетные формулы методики базируются на системе векторных уравнений для установившегося режима и полученной на их основе схемы замещения. Приведен пример расчета показателей асинхронных двигателей мощностью $P_2 = 15$ кВт при работе с постоянным моментом в заданном диапазоне скоростей вращения. Результаты расчета энергетических показателей двигателя при работе с постоянным моментом и при уменьшении напряжения показали, что закон управления, обеспечивающий постоянство потокосцепления ротора, дает более высокие значения КПД и коэффициента мощности. Именно этот закон предпочтителен для использования в системах управления частотно-регулируемого электропривода.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, законы частотного управления, энергетические показатели, оценка эффективности двигателя

Асинхронные двигатели с управлением от автономных преобразователей частоты находят широкое применение благодаря возможности плавного пуска и регулирования частоты вращения в широком диапазоне, что позволяет оптимизировать энергопотребление в различных режимах работы.

Основные классические законы регулирования частоты вращения ниже номинального значения являются:

закон пропорционального регулирования питающего напряжения и частоты: $U_\alpha / f_\alpha = \text{const}$, где $U_\alpha = \alpha U_n$; U_n — номинальное напряжение; $\alpha = f_\alpha / f_n$ — относительное значение частоты; f_α — фактическая частота; f_n — номинальное значение частоты, на которую рассчитан двигатель;

закон, обеспечивающий постоянство потокосцепления статора $\Psi_1 = \text{const}$ или $E_s / f_\alpha = \text{const}$;

закон, обеспечивающий постоянство потокосцепления воздушного зазора $\Psi_m = \text{const}$ или $E_m / f_\alpha = \text{const}$;

закон, обеспечивающий постоянство потокосцепления ротора $\Psi_r = \text{const}$ или $E_r / f_\alpha = \text{const}$, где $E_{s,m,r} = \alpha E_{sn,mn, rn}$ — значения ЭДС в обмотке статора, воздушного зазора и в обмотке ротора, обусловленные синусоидальными изменениями соответствующих потокосцеплений $\Psi_{s,m,r}$ во времени; $E_{sn,mn, rn}$ — номинальные значения этих ЭДС.

Выбор способа управления асинхронным двигателем влияет на параметры энергопотребления в различных режимах его работы, поэтому представляет теоретический интерес расчет энергетических показателей КПД и $\cos(\varphi)$ при использовании этих законов. Тогда при выборе способа управления информация об энергетических показателях, наряду с другими параметрами управления, позволит обоснованно выбрать закон управления АД.

Поскольку повышение энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода с АД является актуальной задачей, то этой теме посвящено множество научных публикаций. Выборочный обзор статей за последние годы показывает, что основное внимание уделяется разработке оптимальных законов управления для конкретных приводов механизмов с учетом особенностей их работы.

Так, в [1] рассматривается подход к определению питающего напряжения на выходе трансформатора по критерию наименьшего потребления активной энергии. В [2] предложен комплексный подход для определения энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов канализационных станций с частотно-регулируемыми приводами. Это позволило определить зависимость напора от подачи насосного агрегата для разных значений частоты вращения с учетом наибольших значений КПД.

В [3] получены общие закономерности частотного управления АД, регулируемым при постоянной статической мощности, обосновано понятие оптимального режима работы двигателя, соответствующего минимуму потерь и максимуму КПД при каждом значении статической мощности нагрузки, и найдены закономерности управления двигателем в оптимальном режиме. В [4] представлена система управления АД, обеспечивающая работу в режиме минимума потерь мощности с учётом типовых нелинейностей и потерь в стали статора. Показано, что в результате применения предлагаемой системы управления уменьшение потерь по сравнению с классическим вариантом скалярного управления может составить до 25%. В [5] исследуется влияние частоты питающего напряжения на энергетические характеристики АД при управлении по закону $U/f = \text{const}$ и показано, что при уменьшении частоты снижаются КПД машины и развиваемый ею момент.

Из приведенного обзора литературы следует, что для эффективного управления частотно-регулируемыми двигателями разрабатываются различные алгоритмы оптимального управления с учетом требований, предъявляемых к конкретному механизму. Эти алгоритмы, являясь итерационными, закладываются в память микропроцессоров. Публикаций, в которых определяются и сравниваются показатели при управлении по законам $\Psi = \text{const}$ и $U/f = \text{const}$, не обнаружено.

С другой стороны, законы управления подробно рассмотрены в учебной литературе [6], в которой на основе системы дифференциальных уравнений описываются динамические и статические режимы работы, рассчитываются механические и токовые зависимости для различных частот. Приведенные в качестве примера выражения суммарного КПД преобразователя и двигателя мощностью $P_2 = 7,5$ кВт достаточно громоздки, что затрудняет их понимание и анализ. Расчёт КПД ведется на основе полученных выражений итерационным методом. Кроме этого, отсутствуют расчеты коэффициента мощности, а также не дается сравнительной оценки значений КПД для перечисленных законов управления.

Цель настоящей статьи — разработка методики расчета КПД и $\cos(\varphi)$ частотно-регулируемого АД при использовании различных законов регулирования, позволяющая сравнительно просто и без итераций определять энергетические показатели и проводить их сравнение.

Математическое описание и исследования. Для исследования и расчета электрических машин в современной теории широко используются схемы замещения, позволяющие достаточно просто устанавливать соотношения между основными величинами,

характеризующими работу машины. На рис. 1 приведена T-образная схема замещения частотно-регулируемого двигателя. Несмотря на то, что преобразователь частоты, как правило, обеспечивает на выходе несинусоидальную форму кривой напряжения, целесообразно провести исследования АД, считая выходные напряжения синусоидальными. Влияние высших гармоник можно учесть поправочными коэффициентами.

Найдем основные уравнения для расчета показателей при различных законах управления, воспользовавшись приведенной схемой замещения, полученной на основе векторных уравнений для напряжений и токов [7]:

$$\gamma U_n = I_s Z_s - E_m = I_s (R_s + j\alpha X_{sn}) - E_m; \quad (1)$$

$$E_m = I_r Z_r = I_r (R_r / s_x + j\alpha X_{rm}); \quad (2)$$

$$E_m = I_m Z_m = I_m (R_m + j\alpha X_{m}); \quad (3)$$

$$I_s + I_r = I_m, \quad (4)$$

где R_s , αX_{sn} — активное и индуктивное сопротивление обмотки статора; R_m — сопротивление магнитных потерь; X_{mn} — главное индуктивное сопротивление; R_r , αX_{rm} — активное и индуктивное сопротивление эквивалентного заторможенного ротора, приведённое к обмотке статора; $\gamma = U_\gamma / U_n$ — относительное значение напряжения; U_γ — напряжение, приложенное к двигателю; I_s , I_m , I_{rM} — токи в обмотке статора, в ветви намагничивания и в обмотке ротора; s_x — скольжение ротора; индексом «n» отмечены величины номинального режима. Векторная диаграмма для схемы замещения (рис. 1) изображена на рис. 2.

При синусоидальном питании эффектом вытеснения тока в рабочем режиме в проводниках ротора можно пренебречь. В этом случае активные сопротивления не зависят от частоты, а индуктивные сопротивления пропорциональны относительной частоте $\alpha = f_\alpha / f_n$. Для учета магнитных потерь в схему замещения введено сопротивление $R_m = R_{mn} \alpha^{1,5}$, эквивалентное потерям в стали.

На основании схемы замещения для рабочего режима можно получить выражение электромаг-

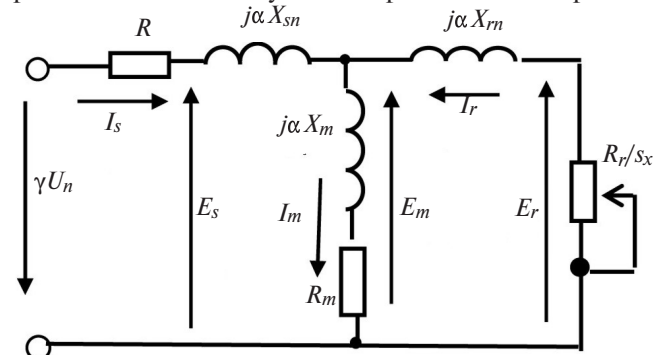


Рис. 1. Схема замещения частотно-регулируемого АД

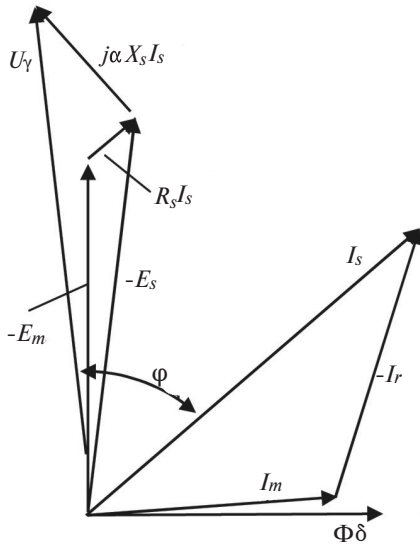


Рис. 2. Векторная диаграмма частотно-регулируемого АД

нитного момента, которое будет использовано в дальнейших расчетах. При работе на частоте f_α аналитически оно записывается в виде:

$$M_e = \frac{m_1 U_\gamma^2 R_r}{s_x \omega_{1\alpha} [(R_s + c_1 R_r / s_x)^2 + (X_s + c_1 X_r)^2]}, \quad (5)$$

где m_1 — число фаз; $c_1 = \sqrt{\frac{(R_s + R_m)^2 + (X_s + X_m)^2}{R_m^2 + X_m^2}}$ — коэффициент рассеяния.

Выразим КПД и коэффициент мощности двигателя через параметры схемы замещения. Для этого найдем эквивалентное сопротивление схемы замещения Z_v относительно входных зажимов:

$$Z_v = Z_s + Z_{mr} = (R_s + R_{mr}) + j(X_s + X_{mr}) = R_v + jX_v, \quad (6)$$

где $Z_{mr} = \frac{Z_m Z_r}{Z_m + Z_r} = R_{mr} + jX_{mr}$ — эквивалентные сопротивления двух параллельных ветвей: ротора и намагничивания;

$$R_{mr} = \frac{(R_m R_r / s_x - X_r X_m)(R_m + R_r / s_x) + (X_m R_r / s_x + R_m X_r)(X_m + X_r)}{(R_m + R_r / s_x)^2 + (X_m + X_s)^2} \rightarrow$$

— активное сопротивление двух параллельных ветвей;

$$X_{mr} = \frac{(X_m R_r / s_x - R_m X_r)(R_m + R_s / s_x) - (R_m R_r / s_x - X_m X_r)(X_m + X_r)}{(R_m + R_r / s_x)^2 + (X_m + X_s)^2} \rightarrow$$

— реактивное сопротивление двух параллельных ветвей.

Модуль входного сопротивления

$$Z_{va} = \sqrt{R_v^2 + X_v^2}. \quad (7)$$

Тогда коэффициент мощности

$$\cos \varphi_\alpha = \frac{R_v}{Z_{va}}, \quad (8)$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1,$$

где P_1 — подводимая мощность; P_2 — полезная мощность.

Согласно преобразованной схеме замещения:

$$P_1 = m_1 I_s^2 R_v; \quad (9)$$

$$P_2 = P_{em}(1 - s_x) - P_{db} - P_{мех},$$

где P_{em} — электромагнитная мощность; $P_{db} = 0,005 P_1$ — добавочные потери; $P_{мех} = P_{мехл} \alpha^2$ — механические потери; $P_{мехл}$ — механические потери при номинальной частоте.

Электромагнитная мощность

$$P_{em} = M_c \omega_{c\alpha} = m_1 I_r^2 R_r / s_x, \quad (10)$$

где $\omega_{1\alpha} = 2\pi f_\alpha / p$ — синхронная скорость вращения магнитного поля при частоте f_α ; p — число пар полюсов. Полагая механические потери $P_{мех} = 0$, получаем выражение для КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{0,995 m_1 I_r^2 R_r \frac{1 - s_x}{s_x}}{m_1 I_s^2 R_v}, \quad (11)$$

где коэффициент 0,995 введен для учета добавочных потерь.

Токи в фазах статора и ротора связаны соотношением согласно схеме замещения (рис. 1):

$$I_r = \frac{Z_m}{Z_m + Z_r} I_s = \frac{\sqrt{R_m^2 + X_m^2}}{\sqrt{(R_m + R_r / s_x)^2 + (X_m + X_r)^2}} I_s. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) и последующих преобразований

$$\eta = \frac{0,995 m_1 I_r^2 R_r \frac{1 - s_x}{s_x}}{m_1 I_s^2 R_v} = \frac{0,995 R_r (1 - s_x) (R_m^2 + X_m^2)}{R_v s_x ((R_m + R_r / s_x)^2 + (X_m + X_r)^2)}. \quad (13)$$

Из (8), (13) следует, что энергетические показатели АД при постоянных параметрах схемы замещения зависят только от скольжения, которое определяется заданным моментом нагрузки на валу ротора. Определим скольжение s_x , соответствующее моменту нагрузки M_c для законов управления, перечисленных выше.

Для закона $U/f = \text{const}$ электромагнитный момент согласно (5)

$$M_{ef} = \frac{m_1 U_\alpha^2 R_r}{s_x \omega_{1\alpha} [(R_s + c_1 R_r / s_x)^2 + (X_s + c_1 X_r)^2]}, \quad (14)$$

где напряжение и индуктивные сопротивления рассчитываются при частоте f_α : $U_\alpha = \alpha U_n$; $X_s = \alpha X_{sn}$; $X_r = \alpha X_{rm}$; $X_m = \alpha X_{mn}$.

Представим (14) в виде квадратного уравнения относительно скольжения s_x . После преобразований получим уравнение второй степени:

$$as_x^2 + bs_x + c = 0, \quad (15)$$

где

$$a = R_s^2 + (X_s + c_1 R_r)^2; \quad b = 2R_s R_r c_1 - AR_r;$$

$$c = c_1 R_r^2; \quad A = \frac{m_1 U_\alpha^2}{\omega_{1\alpha} M_c}.$$

Решение (15) имеет вид

$$s_x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (16)$$

Для регулирования частоты и напряжения при постоянном потокоцеплении обмотки статора ($\Psi_s = \text{const}$) выражение для электромагнитного момента можно получить из (15), если положить $R_s = 0$ и заменить напряжение U_α на ЭДС $E_s = \alpha E_{sn}$:

$$M_{es} = \frac{m_1 E_s^2 R_r}{s_x \omega_{1\alpha} [(c_1 R_r / s_x)^2 + (X_s + c_1 X_r)^2]}. \quad (17)$$

Скольжение s_x определяется по (16), коэффициенты которого вычисляются при условии $R_s = 0$.

Выражение для момента при законе управления $\Psi_m = \text{const}$ записывается аналогично, если в (14) принять сопротивление фазы статора $Z_s = R_s + jX_s = 0$ и заменить U_α на ЭДС $E_m = \alpha E_{mn}$, учитывая, что коэффициент $c_1 = 1$. Тогда при $\Psi_0 = \text{const}$

$$M_{em} = \frac{m_1 E_m^2 R_r}{s_x \omega_{1\alpha} [(R_r / s_x)^2 + (X_r)^2]}. \quad (18)$$

Скольжение s_x определяется по (16), коэффициенты которого вычисляются при условии $R_s = X_s = 0$.

Выражение момента для закона $\Psi_r = \text{const}$ определяется аналогично предыдущим случаям, если в (14) положить $R_s = X_s = X_r = 0$ и заменить U_α на ЭДС $E_r = \alpha E_{rm}$.

После преобразований при $\Psi_r = \text{const}$

$$M_{er} = \frac{m_1 E_r^2}{s_x \omega_{1\alpha} (R_r / s_x)}. \quad (19)$$

Скольжение, соответствующее моменту M_c ,

$$s_x = \frac{M_c R_r \omega_{1\alpha}}{m_1 \alpha E_m^2}. \quad (20)$$

Значения ЭДС в номинальном режиме в (17), (18) и (19) определяются согласно схеме замещения (рис. 1):

$$E_{sn} = U_n - I_{sn} R_s, \quad (21)$$

тогда модуль ЭДС

$$E_{sn} = \sqrt{(U_n - I_{sn} R_s \cos \varphi_n)^2 + (I_{sn} R_s \sin \varphi_n)^2}. \quad (22)$$

ЭДС равна

$$E_{mn} = U_n - I_{sn} (R_s + jX_s).$$

Модуль ЭДС

$$E_{mn} = \sqrt{(U_n - (I_{sn} R_s \cos \varphi_n + I_{sn} X_s \sin \varphi_n))^2 + (I_{sn} R_s \sin \varphi_n - I_{sn} X_s \cos \varphi_n)^2}. \quad (23)$$

Выражение для ЭДС

$$E_{rm} = E_{mn} - I_{rm} jX_r = E_{mn} - I_{sn} \frac{Z_m}{Z_m + Z_r} (jX_r).$$

Модуль ЭДС

$$E_{rm} = \sqrt{(E_{mn} - I_{sn} c_2 X_r \sin \varphi_n)^2 + (I_{sn} c_2 X_r \cos \varphi_n)^2}, \quad (24)$$

где $c_2 = \sqrt{\frac{R_m^2 + X_m^2}{(R_m + R_r / s_n)^2 + (X_m + X_r)^2}}$; s_n , $\cos \varphi_n$ – скольжение и коэффициент мощности в номинальном режиме.

Напряжение на зажимах схемы замещения

$$U_\gamma = I_s Z_{va}, \quad (25)$$

где ток I_s определяется согласно (12) по току I_r , который (см. (10)) равен:

$$I_r = \sqrt{\frac{M_c \omega_{c\alpha} s_x}{m_1 R_r}}.$$

Полученные выражения позволяют рассчитать с целью сравнения энергетические показатели АД при различных законах управления, а также при любых заданных значениях напряжения или ЭДС и моментов нагрузки.

При проведении теоретических исследований энергетических показателей при различных законах частотного управления для примера был выбран трехфазный асинхронный двигатель 4A160S4Y3 с номинальной мощностью $P_n=15$, кВт. Параметры схемы замещения и показатели исследуемого двигателя в номинальном режиме: $R_s=0,355$ Ом; $X_s=0,673$ Ом; $X_m=27,14$ Ом; $R_m=1,47$ Ом; $R_r=0,186$ Ом; $X_r=0,912$ Ом; число полюсов $2p=4$; номинальный момент $M_n=97,8$ Нм; энергетические показатели: $\eta_n=0,892$ и $\cos\varphi_n=0,894$; значения ЭДС в номинальном режиме: $E_{sn}=211,2$ В; $E_{mn}=204,3$ В; $E_m=203,1$ В.

Предполагаем, что двигатель работает с постоянным моментом $M_c=0,5M_n$ в диапазоне значений частоты вращения ротора $n=250\div 1460$ об/мин.

На рис. 3 приведены результаты расчета КПД при различных законах частотного регулирования, построенные по предлагаемой методике. Анализ зависимостей показывает, что значения КПД двигателей различной мощности при рассмотренных законах управления практически совпадают.

На рис. 4 представлены значения коэффициента мощности исследуемых двигателей при четырех законах регулирования. Как видно, наибольшее значение $\cos(\varphi)$ в зонах большой частоты вращения обеспечивает закон управления $\Psi_r = \text{const}$ — значения $\cos\varphi$ на 2–5% превышают таковые при законе управления $U/f = \text{const}$. В области низких частот наибольшее значение коэффициента мощности — при законе $U/f = \text{const}$, что объясняется различным наклоном механических характеристик в области низких и высоких значений частоты вращения.

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента эффективности, равного произведению КПД и коэффициента мощности ($k_{ef} = \eta \cos\varphi$). Видно, что

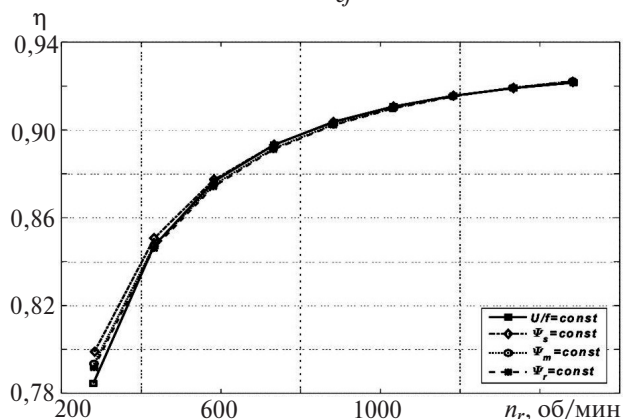


Рис. 3. Значения КПД при различных законах управления

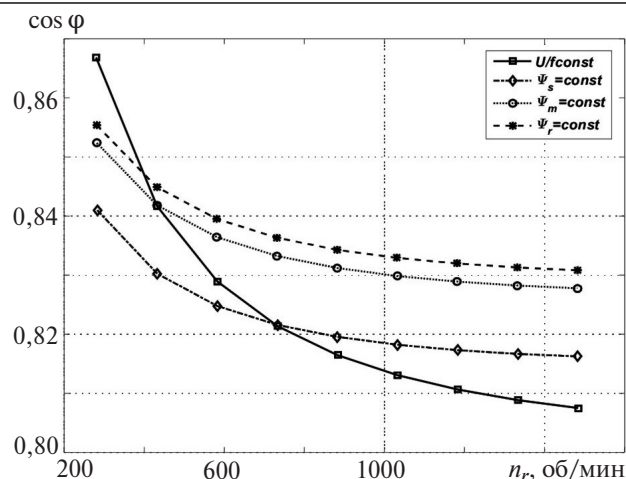


Рис. 4. Значения $\cos\varphi$ при различных законах управления

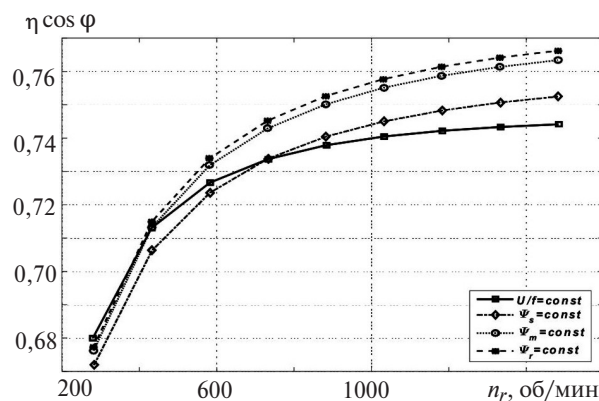


Рис. 5. Значения $k_{ef} = \eta \cos\varphi$ при различных законах управления

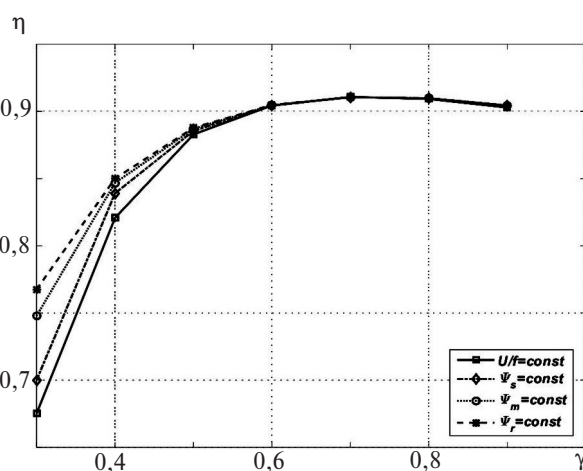


Рис. 6. Зависимости КПД от напряжения при различных законах управления

более высокую энергетическую эффективность АД обеспечивает закон $E_r/f = \text{const}$.

Представляет интерес сравнить законы управления при работе АД со значениями постоянного момента, меньшими номинального, при уменьшении напряжения и заданной частоте питания. Используя полученные выражения, был сделан расчет исследуемого двигателя при моменте нагрузки $M_i=0,5M_n$ и относительном значении частоты

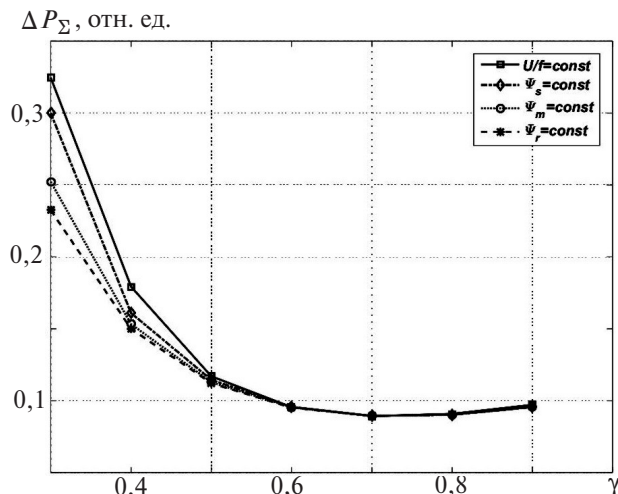


Рис. 7. Зависимости суммарных потерь от напряжения при различных законах управления

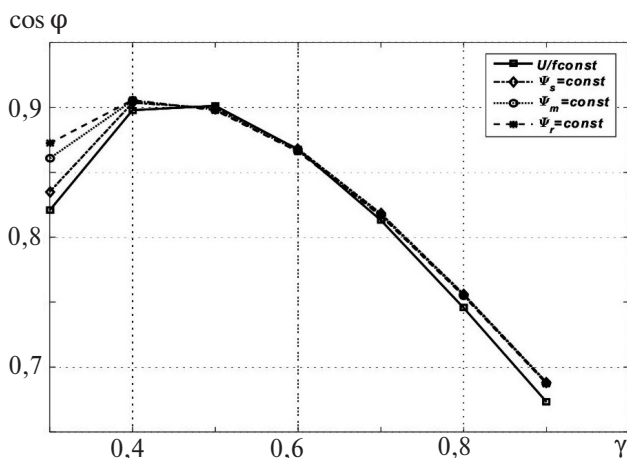


Рис. 8. Зависимости $\cos\varphi$ от напряжения при различных законах управления

$\alpha=0,7$, относительное значение напряжения γ менялось в диапазоне 0,3÷0,9.

На рис. 6 представлены результаты расчета КПД при изменении напряжения. Наибольший КПД обеспечивает управление по закону $\Psi_r = \text{const}$. Это связано с тем, что именно при этом законе управления потери мощности в двигателе будут минимальными (рис. 7).

Зависимости на рис. 8 также показывают, что при этом законе управления значения $\cos\varphi$ наибо-

лее высокие. Расчетами установлено, что закон $\Psi_r = \text{const}$ обеспечивает не только лучшее управление электроприводом в статических и динамических режимах, но и способствует повышению коэффициента мощности и энергоэффективности двигателя и, следовательно, всего электропривода.

Таким образом, разработанная методика позволяет рассчитывать энергетические показатели и выбирать тот закон регулирования, который напрямую связан с поставленной целью, заключающейся в оптимизации энергетических параметров потребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальгин Г.В., Беспалов А.В. Расчетный метод определения величины напряжения питания асинхронного электродвигателя для повышения эффективности работы установки электроцентробежного насоса. — Динамика систем, механизмов и машин, 2014, № 1, с. 307—310.
2. Мальцев А.Н., Хватов О.С. Определение энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов с частотно-регулируемым электроприводом на канализационных станциях. — Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексева, 2017, № 4 (119), с. 100—107.
3. Попов А.Н., Сайфутдинов В.Б. Частотное регулирование асинхронного двигателя при постоянной мощности. — Известия вузов. Проблемы энергетики, 2006, № 1—2, с. 46—58.
4. Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь. — Электротехника, 2012, № 12, с. 26—31.
5. Островлянич В.Ю., Поползин И.Ю. Исследование магнитной системы асинхронного двигателя при частотном управлении. — Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2016, № 2(114), с.75—84.
6. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Издательский центр «Академия», 2004, 256 с.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006, 272 с.

[03.06.2019]

А в т о р ы: Соколова Елена Михайловна — кандидат техн. наук, доцент Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), диссертацию защитила в 1977 г.

Мощинский Юрий Анатольевич — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1975 г.

Evaluating the Efficiency of the Classic Adjustable-Frequency Induction Motor Control Laws

SOKOLOVA Elena M. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

MOSHCHINSKY Yuri A. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

Adjustable-frequency induction motor-based drives occupy the dominating place among adjustable electric drives. Therefore, it is important to consider rational methods for controlling induction motors (IMs) from the viewpoint of decreasing their energy consumption. There are two such control methods: using the proportional law of controlling the motor power supply frequency and voltage and using the law that maintains constant stator and rotor flux linkages and the main flux linkage in the air gap. A procedure for calculating the power performance indicators of an adjustable-frequency IM for these control laws is proposed, using which they can be calculated and compared in a relatively simple manner without iterations. The calculation formulas used in the procedure are based on the system of vector equations for a steady-state operation mode and on the equivalent circuit drawn from these equations. An example of calculating the indicators of induction motors with the capacity $P_2 = 15$ kW during their operation with a constant torque in the specified range of rotation frequencies is given. The results from calculating the motor power performance indicators during motor operation with a constant torque and with decreasing the power supply voltage have shown that the control law maintaining a constant rotor flux linkage yields higher values of the efficiency and power factor. It is exactly this law that is more preferable for use in the adjustable-frequency drive control systems.

Key words: *induction motor, frequency control laws, power performance indicators, motor effectiveness evaluation*

REFERENCES

1. **Malgin G.V., Bepalov A.V.** *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin – in Russ. (Dynamics of systems, mechanisms and machines)*, 2014, No.1, pp. 307–310.
2. **Maltsev A.N., Khvatov O.S.** *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva – in Russ. (Proceedings of the NSTU. R.E.Alekseyev)*, 2017, No. 4(119), pp.100–107.
3. **Popov A.N., Saifutdinov V.B.** *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki – in Russ. (News of higher educational institutions. Problems of Energy)*, 2006, No. 1–2, pp. 46–58.
4. **Kosmodamiansky A.S., Vorobev V.I., Pugachev A.A.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2012, No. 12, pp. 26–31.
5. **Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu.** *Uestnik Kuzbasskogo gos. tekhn. universiteta – in Russ. (Bulletin of Kuzbass State Technical University)*, 2016, No. 2(114), pp.75–84.
6. **Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V.N.** *Energoberegayushchii asinchronyi electroprivod. (Energy saving asynchronous electricdrive)*. Moscow, Publishing Center «Academy», 2004, 256 p.
7. **Sokolovsky G.G.** *Electroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniyem (AC drives with frequency regulation)*. Moscow, Publishing Center «Academy», 2006, 272 p.

[03.06.2019]