

В.С. Петрушин, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев, Н.С. Прокопенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С СОГЛАСУЮЩИМИ ТРАНСФОРМАТОРОМ И РЕДУКТОРОМ

Розглянуто використання розроблених алгоритмів для моделювання динамічних режимів двох асинхронних двигунів в електроприводах, що працюють на певну циклограму навантаження, при включенні узгоджувальних трансформатора і редуктора. Враховано мінливість параметрів схем заміщення двигунів, пов'язана зі зміною насичення магнітних кіл і витісненням струмів в обмотках роторів. Отримано і зіставлені динамічні характеристики струмів і потужностей, споживаних двигунами. Залежності ККД і коефіцієнта потужності двигунів дозволили визначити середньоциклічні енергетичні показники. Знайдено масогабаритні і вартісні показники варіантів електроприводів, що дало можливість, при відомих середньоциклічних енергетичних показниках приводів, розрахувати середньоциклічні приведені витрати електроприводів. Обґрунтовано можливість вибору кращого варіанту приводу за вищевказаними показниками, а також за мінімумом втрат електроенергії за рік. Бібл. 17, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: асинхронний двигун, циклограма навантаження, редуктор, трансформатор, математична модель, середньоциклічні критерії, енергетичні показники, приведені витрати.

Рассмотрено использование разработанных алгоритмов для моделирования динамических режимов двух асинхронных двигателей в электроприводах, работающих на определенную циклограмму нагрузки, при включении согласующих трансформатора и редуктора. Учтено непостоянство параметров схем замещения двигателей, связанное с изменением насыщения магнитных цепей и вытеснением токов в обмотках роторов. Получены и сопоставлены динамические характеристики токов и мощностей, потребляемых двигателями. Зависимости КПД и коэффициента мощности двигателей позволили определить среднециклические энергетические показатели. Найдены массогабаритные и стоимостные показатели вариантов электроприводов, что дало возможность, при известных среднециклических энергетических показателях приводов, рассчитать среднециклические приведенные затраты электроприводов. Обоснована возможность выбора лучшего варианта привода по вышеуказанным показателям, а также по минимуму потерь электроэнергии за год. Библ. 17, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, циклограмма нагрузки, редуктор, трансформатор, математическая модель, среднециклические критерии, энергетические показатели, приведенные затраты.

Введение. Разнообразие электроприводов (electric drives – ED), эксплуатационные характеристики которых соответствуют задаваемым требованиям потребителей при обеспечении надежной и экономичной работы в течение определенного ресурса времени, характеризует многообразие схемных решений, в том числе с использованием согласующих трансформаторов и редукторов. Величина нагрузки привода может меняться во времени, что характеризуется режимом работы, описываемым циклограммой нагрузки. От режима работы, т.е. от соотношения длительности периодов работы и пауз между ними или периодов работы с полной или частичной нагрузкой, от частоты включения машины и характера протекания переходных процессов, зависит нагрев электрической машины. Наряду со стандартными режимами работы [1], возможны и нестандартные [2, 3]. Стандартные характеризуются различными временными показателями (продолжительностью включения, продолжительностью нагрузки, продолжительностью работы, частотой включения и т.д.).

Правильный выбор электропривода должен обеспечить высокие энергетические показатели в процессе эксплуатации, свидетельствующие о его рациональном использовании. При соизмеримости времени работы асинхронных двигателей (induction motor – IM) в установившихся и неустойчивых (пуск, переход с одной нагрузки на другую) режимах, переходные процессы оказывают существенное влияние на показатели электроприводов. В ряде случаев IM эксплуа-

тируются в перемежающихся режимах, связанных с чередованием работы двигателя на разные по величине нагрузки. Переходные процессы в IM рассматривались рядом авторов [2, 4]. Вместе с тем, отказ от использования некоторых допущений при моделировании динамических режимов работы IM позволяет уточнить математические модели (ММ) [5].

Использование согласующих трансформаторов и редукторов значительно изменяет эксплуатационные характеристики ED. Большинство статей посвящено моделированию ED без таких элементов как статические, так и в динамических режимах [2, 4-7]. В ряде работ [8-11] анализ выполняется с учетом трансформаторов и редукторов. Целесообразно рассмотреть моделирование ED с использованием этих элементов.

Целью статьи является использование разработанных алгоритмов для моделирования динамических режимов работы асинхронных двигателей в электроприводах с согласующими трансформаторами и редукторами и обоснование возможности сопоставления рассматриваемых электроприводов по массогабаритным, стоимостным, энергетическим и затратным показателям, а также по годовым затратам электроэнергии с целью выбора рационального варианта привода.

Постановка задачи. Все рассматриваемые приводы работают на определенную нагрузочную циклограмму и обеспечивают на механизме практически одинаковое число оборотов. В моделях согласующих трансформаторов и редукторов используются исход-

© В.С. Петрушин, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев, Н.С. Прокопенко

ные данные, определяющих как функциональные свойства, так и массогабаритные и стоимостные показатели. Последние дают возможность рассмотреть экономические аспекты ЕД. К числу функциональных относятся: для редуктора – передаточное число (i_{red}), для трансформатора – коэффициент трансформации (k_{tr}). Корректность расчета энергетического баланса электропривода требует использования КПД рассматриваемых элементов (η_{red} , η_{tr}). Моделируя ЕД с включением редукторов и трансформаторов в статических и динамических режимах, определяются частота вращения (n_{mech}) и момент (M_{mech}) на приводном механизме, потребляемая приводом мощность (P_{ED}), КПД привода (η_{ED}), мощность нагрузочного механизма (P_{mech}). Кроме того, представляется возможным рассчитать массогабаритные и стоимостные показатели всего ЕД при использовании тех или иных рассматриваемых компонентов.

Выражения, учитывающие включение редуктора и трансформатора в ЕД при рассмотрении статических режимов, имеют вид:

$$n_{mech} = \frac{n}{i_{red}}, \quad (1)$$

$$M_{mech} = M_{IM} \cdot i_{red} \cdot \eta_{red}, \quad (2)$$

$$P_{mech} = P_{IM} \cdot \eta_{red}, \quad (3)$$

$$P_{ED} = P_1 + (1 - \eta_{tr}) \cdot P_1, \quad (4)$$

$$\eta_{ED} = \eta_{IM} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{red}, \quad (5)$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k_{tr}}, \quad (6)$$

где n – частота вращения двигателя; M_{IM} – момент на валу двигателя; P_{IM} – полезная механическая мощность на валу двигателя; P_1 – потребляемая активная мощность двигателя; U_1 – первичное напряжение трансформатора; U_2 – вторичное напряжение трансформатора.

Математические модели, используемые для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях, основаны на системах нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат [6, 7]:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{sa} = u_{sa}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{sa}(t) - x_M(t) \Psi_{ra}(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} = u_{s\beta}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{r\beta}(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{ra} = [-p\omega_r \cdot \Psi_{r\beta}(t) - r_r(t) d(t) [x_s(t) \Psi_{ra}(t) - x_M(t) \Psi_{sa}(t)], \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} = [p\omega_r \cdot \Psi_{r\beta}(t) - r_r(t) d(t) [x_s(t) \Psi_{r\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t)],$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} d(t) x_M(t) [\Psi_{s\beta}(t) \Psi_{ra}(t) - \Psi_{r\beta}(t) \Psi_{sa}(t)] - M_L(\omega_r) / (i_{red} \cdot \eta_{red}) \right\},$$

где $\Psi_{sa}(t)$, $\Psi_{s\beta}(t)$, $\Psi_{ra}(t)$, и $\Psi_{r\beta}(t)$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток машины, соответственно

по осям α и β ; ω_r – угловая частота вращения двигателя; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; $M_L(t)$ – зависимость момента сопротивления механизма от времени; r_s , $r_r(t)$, $x_s(t)$, $x_r(t)$, $x_M(t)$ – активные и полные реактивные сопротивления обмоток статора и ротора и сопротивление взаимной индукции, причем все они, за исключением r_s изменяются на каждом шаге интегрирования; $d(t)$ – вспомогательная переменная $d(t) = [x_s(t) \cdot x_r(t) - (x_M(t))^2]^{-1}$; $u_{sa}(t)$ и $u_{s\beta}(t)$ – мгновенные значения напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудой напряжения U_m и угловым положением обобщенного вектора напряжения φ_1 :

$$u_{sa}(t) = U_m(t) \cdot \cos(\varphi_1), \quad u_{s\beta}(t) = U_m(t) \cdot \sin(\varphi_1). \quad (8)$$

Выражения, связывающие мгновенные значения токов и потокосцеплений, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} i_{s\alpha}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{r\alpha}(t)] \\ i_{s\beta}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{r\beta}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

где i_{sa} , $i_{s\beta}$ – токи статора по осям α и β . Мгновенное значение тока статора:

$$i_1(t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [i_{s\alpha}(t)^2 + i_{s\beta}(t)^2]}. \quad (10)$$

Математическая модель, построенная на базе вышеописанных дифференциальных уравнений, позволяет провести расчеты частот вращения, токов в фазах обмоток, электромагнитных моментов, потерь.

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры двигателя, изменяющиеся в каждой рабочей точке, в том числе и вследствие явления насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора [12, 13]. Один из подходов к анализу динамических характеристик ИМ предполагает предварительное определение этих коэффициентов для необходимых рабочих точек. Поэтому до анализа переходного процесса проводятся расчеты установившихся режимов с целью получения значений всех параметров схемы замещения с учетом вытеснения тока в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек. Для этого используются ММ установившихся режимов. При расчетах динамических режимов учитываются изменения на каждом шаге интегрирования системы, т.е. в определенных точках характеристики перехода от одного момента нагрузки к другому, параметров схемы замещения. При реализации такого подхода обеспечивается повышение уровня адекватности ММ.

В ряде работ [14-16] в отличие от классической теории, согласно которой значения мощностей рассчитываются как интегральные, используются мгновенные значения мощностей. Тогда потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах при условии синусоидального напряжения питания рассчитывается через мгновенные значения напряжений и токов:

$$p_1'(t) = \frac{3}{2} \cdot [u_{sa}(t) \cdot i_{s\alpha}(t) + u_{s\beta}(t) \cdot i_{s\beta}(t)]. \quad (11)$$

Реальная потребляемая активная мощность p_1 больше условной на величину суммы неучтенных

потерь (основных в магнитопроводе $\Delta p_{st\ base}$, добавочных в магнитопроводе $\Delta p_{st\ add}$, механических Δp_{mech} , добавочных Δp_{add}):

$$p_1(t) = p'_1(t) + \Delta p_{st\ base}(t) + \Delta p_{st\ add}(t) + \Delta p_{mech}(t) + \Delta p_{add}(t). \quad (12)$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через потокосцепления и токи с использованием значения частоты вращения ротора:

$$p_{IM}(t) = \omega_r \frac{3p}{2} [i_{r\beta}(t)\Psi_{r\alpha}(t) - i_{r\alpha}(t)\Psi_{r\beta}(t)] - \Delta p_{mech}(t) - \Delta p_{add}(t). \quad (13)$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя p_{IM} к потребляемой активной мощности p_1 .

В качестве критериев выбора привода могут использоваться масса, габариты, стоимость двигателя или привода, среднециклические приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию (RC_{mc}), среднециклические энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), либо может быть применен обобщенный критерий, учитывающий в качестве составляющих вышеперечисленные критерии. Условно критерии могут быть разделены на две группы: массогабаритную и стоимостную; энергетическую и затратную. Результаты выбора изменяются при различных используемых критериях или при различных их составляющих в обобщенном критерии, а также зависят от задаваемых коэффициентов значимости этих составляющих. При расчете критериев могут приниматься во внимание их значения в переходных режимах работы. Такой подход позволяет осуществлять выбор как для режимов работы, в которых продолжительности переходных режимов значительно меньше продолжительностей работы в установившихся режимах, так и для режимов при соизмеримости вышеуказанных продолжительностей.

В случае учета переходных режимов энергетическозатратная группа критериев двигателя или привода определяется:

$$\eta_{mc\ IM(ED)} = \frac{1}{t_{end} - t_{start}} \cdot \int_{t_{start}}^{t_{end}} \eta_{IM(ED)}(t) dt, \quad (14)$$

$$\cos \varphi_{mc\ IM(ED)} = \frac{1}{t_{end} - t_{start}} \cdot \int_{t_{start}}^{t_{end}} \cos \varphi_{IM(ED)}(t) dt, \quad (15)$$

$$RC_{mc\ IM(ED)} = \frac{1}{t_{end} - t_{start}} \cdot \int_{t_{start}}^{t_{end}} RC_{IM(ED)}(t) dt, \quad (16)$$

где t_{end} – время конца цикла; t_{start} – время начала цикла.

При известной полной стоимости двигателя cim значение критерия определяется как:

$$RC_{IM} = (cim + C_{rIM})[1 + T_N(k_{de} + k_s)] + CL_{IM},$$

где C_{rIM} – стоимость затрат на компенсацию реактивной мощности, грн; CL_{IM} – стоимость потерь электроэнергии за год, грн; T_N – нормативный срок окупаемо-

сти двигателя, лет; k_{de} – доля затрат на амортизационные отчисления; k_s – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя.

Для общепромышленных ИМ принимаются значения $T_N = 5$ лет, $k_{de} = 0,065$, $k_s = 0,069$. Тогда $RC_{IM} = 1,67(cim + C_{rIM}) + CL_{IM}$, где $C_{rIM} = C_{cre}P_1(\tan \varphi_1 - 0,484)$ и $CL_{IM} = C_{cae}P_1(1,04 - \eta_{IM})$, C_{cae} – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течение срока службы двигателя (0,05 с.ч. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в году (2100), числа лет работы до капитального ремонта (5) и коэффициента относительной загрузки двигателя (1,0), C_{cre} – коэффициент, учитывающий стоимость компенсации реактивной энергии и представляющий собой произведение стоимости 1 kVAг реактивной мощности компенсирующих устройств (15 с.ч. за 1 kVAг), коэффициента участия двигателя в максимуме нагрузки системы (0,25) и коэффициента относительной загрузки. Аналогичным образом при известной стоимости всего электропривода ced определяются приведенные затраты привода RC_{ED} .

Если в качестве критерия выбора использовать такой энергетический показатель, как КПД, будет обеспечиваться энергосберегающая эксплуатация двигателя.

Результаты исследований. В соответствии с вышесказанным на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета был разработана программа DIMDrive, аналогичная программе DIMASDrive [17]. Программа основана на системных принципах, позволяющих учесть наличие определенных возможных компонентов электропривода. В связи с этим в состав комплексной проектной модели наряду с моделями ИМ (для установившегося режима, основанной на Т-образной схеме замещения, для динамического режима – на системе дифференциальных уравнений обобщенной машины) входит и модель нагрузочной диаграммы $M(t)$, а также, при необходимости, модели согласующего величины напряжений сети и двигателя трансформатора и редуктора (между двигателем и нагрузкой). Модели двигателя предполагают рассмотрение машин различных конструктивных исполнений, степеней защиты, систем вентиляции, типов роторов и т.д. и учитывают изменение параметров схем замещения двигателя вследствие насыщения стали магнитопровода и вытеснения токов в обмотках двигателя, наличие основных и добавочных потерь в стали в статических и динамических режимах работы двигателя, наличие высших пространственных гармоник магнитного поля. Предусмотрен анализ электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловых процессов при работе ИМ на различные по величине и режиму работы нагрузки. Программа позволяет реализовать комплексный анализ работы ИМ, на основе которого рассматриваются все наиболее важные аспекты функционирования двигателя.

Вышеуказанная программа была использована для моделирования работы двигателей и электроприводов при решении такой производственной задачи.

Нагрузка описывается следующей циклограммой: 2 s – 50 N·m, 1 s – 98 N·m. Рассматриваются четыре варианта электроприводов при напряжении питающей сети 380 V и частоте сети 50 Hz, что отражено на рис. 1.

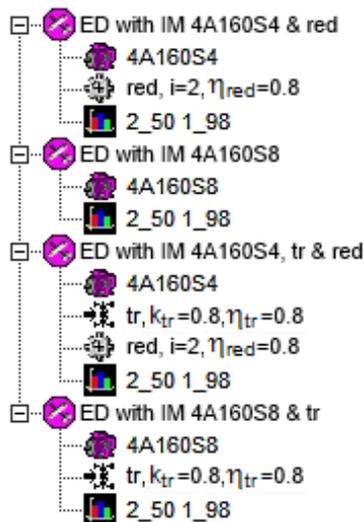


Рис. 1. Окно вариантов электроприводов программы DIMDrive

Использовались двигатели 4A160S4 и 4A160S8. В разных вариантах были различные суммарные моменты инерции, учитывающие моменты инерции двигателя и приводного механизма (ED с 4A160S4 – 0,3 kg·m², ED 4A160S8 – 0,5 kg·m²). Для обеспечения одинакового числа оборотов механизма в варианты с двигателем 4A160S4 включены редукторы. Параметры редуктора представлены на рис. 2. Для упрощения массогабаритные и стоимостные параметры редуктора взяты условно равными 100.

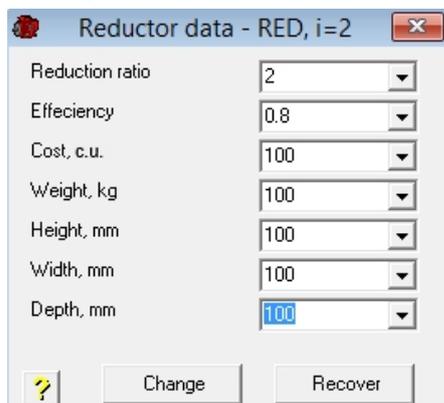


Рис. 2. Окно параметров редуктора программы DIMDrive

В двух вариантах на входе привода использовался трансформатор, параметры которого показаны на рис. 3. Для упрощения массогабаритные и стоимостные параметры трансформатора взяты условно равными 100. Для получения значений $\cos\varphi_{mcED}$ используется коэффициент мощности трансформатора расчетный ($k_{ptrc} = 0,8$):

$$\cos\varphi_{mcED} = \cos\varphi_{mcIM} \cdot k_{ptrc} \quad (17)$$

Проведенные тепловые расчеты (задан максимальный момент из циклограммы для установившегося

режима) показали превышение температуры обмотки статора двигателя выше допустимой в ED с IM 4A160S8 с трансформатором (рис. 4). Ввиду этого данный вариант привода далее не рассматривается. Нумерация характеристик соответствует варианту нумерации электроприводов в табл. 1, а именно: 1 – ED с IM 4A160S4 с редуктором; 2 – ED с IM 4A160S8 без редуктора и трансформатора; 3 – ED с IM 4A160S4 с редуктором и трансформатором; 4 – ED с IM 4A160S8 с трансформатором.

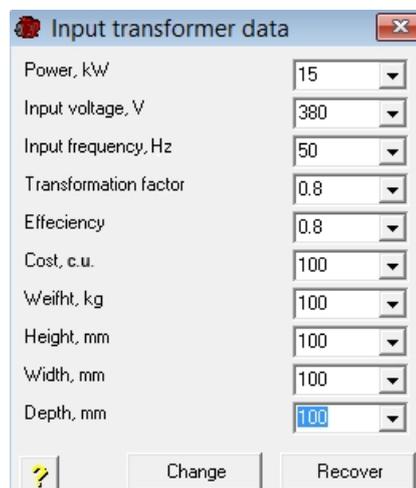


Рис. 3. Окно параметров трансформатора программы DIMDrive

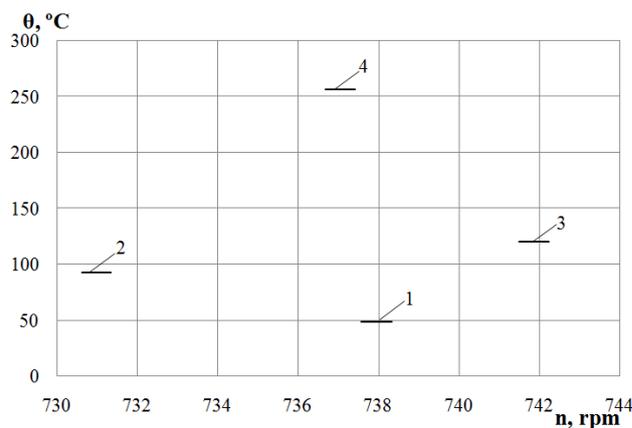


Рис. 4. Температуры статорных обмоток двигателей

Динамические характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических величин во времени на входе двигателя, представлены на рис. 5-8. Нумерация характеристик соответствует варианту нумерации электроприводов в табл. 1. Программа DIMDrive позволяет при рассмотрении динамических характеристик исключать из представления пусковой режим, что и сделано в дальнейшем. Аналогично могут быть рассчитаны динамические характеристики и на входе привода.

В табл. 1 приведены значения показателей рассмотренных ED, к числу которых относятся среднечисловые КПД (η_{mc}), коэффициент мощности ($\cos\varphi_{mc}$), приведенные затраты (RC_{mc}), а также массогабаритные и стоимостные показатели как двигателей, так и приводов.

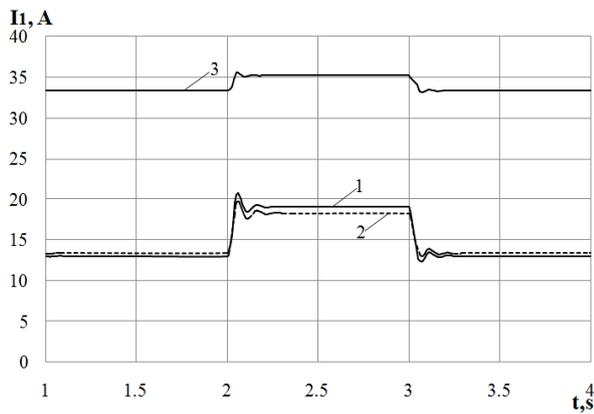


Рис. 5. Зависимости токов, потребляемых двигателями

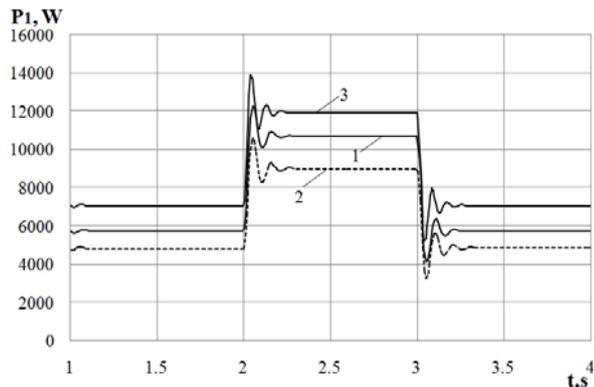


Рис. 6. Зависимости потребляемых двигателями активных мощностей

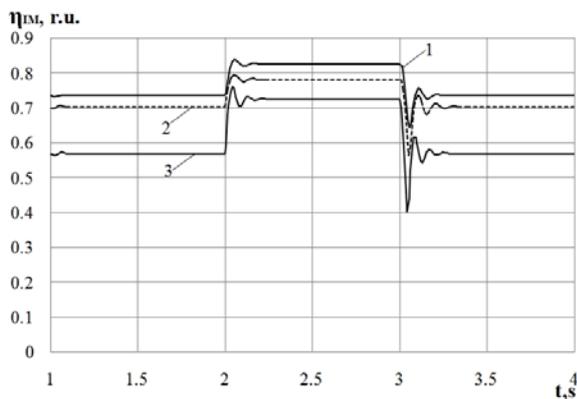


Рис. 7. Зависимости КПД двигателей

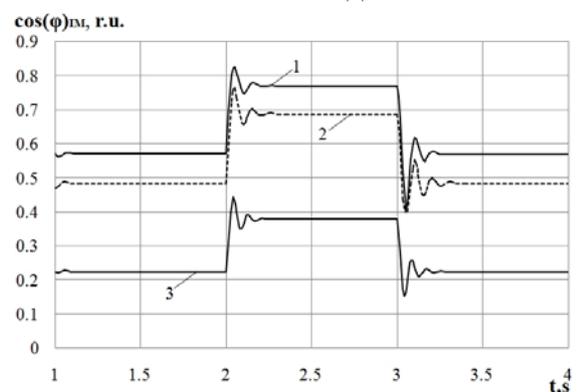


Рис. 8. Зависимости коэффициента мощности двигателей

Может быть выполнен расчет стоимости потерь активной энергии за год:

$$C_a = C \cdot T_{year} \cdot K_L \cdot P_{ED} \cdot (1 + 0,04 - \eta_{mcED}) / \eta_{mcED}, \quad (18)$$

где $C = 0,05$ с.у. – цена за $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$; $T_{year} = 2100$ – число часов работы ED в году; K_L – коэффициент загрузки (принимается равным 1,0); 0,04 – относительная величина потерь в распределительной сети потребителя.

Таблица 1

Сравнение показателей различных ED

Показатели и параметры	№1 – с 4A160S4 с редуктором	№2 – с 4A160S8 без редуктора и трансформатора	№3 – с 4A160S4 с редуктором и трансформатором
$\eta_{mc} \text{ IM, \%}$	76,54	72,89	62,16
$\cos\varphi_{mc} \text{ IM, г.у.}$	0,636	0,551	0,276
$\eta_{mc} \text{ ED, \%}$	61,23	72,89	39,78
$\cos\varphi_{mc} \text{ ED, г.у.}$	0,636	0,551	0,221
$RC_{mc} \text{ IM, с.у.}$	2172	1980	3146
$RC_{mc} \text{ ED, с.у.}$	2932	1980	5181
Масса IM, kg	118,9	111,8	118,9
Объем IM, dm ³	9,62	10,73	9,62
Стоимость IM, с.у.	642	552	642
Масса ED, kg	218,9	111,8	318,9
Объем ED, dm ³	10,62	10,73	11,62
Стоимость ED, с.у.	742	552	842

Выполнено сопоставление рассмотренных вариантов ED по стоимости потерь активной энергии за год (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение стоимостей потерь активной энергии различных ED

Показатели и параметры	№1 – с 4A160S4 с редуктором	№2 – с 4A160S8 без редуктора и трансформатора	№3 – с 4A160S4 с редуктором и трансформатором
$\eta_{mc} \text{ ED, \%}$	61,23	72,89	39,78
Стоимость потерь активной энергии за год, с.у.	541	279	1768

Выводы

1. Разработана программа DIMDrive, позволяющая анализировать динамические режимы работы асинхронных двигателей, в том числе в системах электроприводов с согласующими трансформаторами и редукторами и являющаяся базой для проектирования двигателей для различных режимов работы.

2. Для сопоставления эффективности рассматриваемых электроприводов предлагаются среднециклические критерии энергетической и затратной групп, которые учитывают соответствующие показатели как в установившихся, так и в переходных режимах.

3. Из трех рассмотренных электроприводов преимущество имеет ED с двигателем 4A160S8 без редуктора и трансформатора по следующим причинам:

- наибольшее значение среднециклического КПД электропривода;
- наименьшее значение среднециклических приведенных затрат электропривода;

• наименьшее значение стоимости потерь активной энергии за год.

4. Если в качестве критерия выбора использовать среднециклический коэффициент мощности электропривода, то преимущество имеет ЭД с двигателем 4A160S4 с редуктором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60034-1:2004. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
2. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах. – М.: МЭИ, 1987. – 72 с.
3. Дунайкина Е.А. Разработка модификации асинхронных двигателей единой серии 4А (H = 56-132 мм) для кратковременных режимов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1986. – 20 с.
4. Nyein Nyein Soe, Thet Thet Han Yee, Soe Sandar Aung. Dynamic Modeling and Simulation of Three-phase Small Power Induction Motor // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2008. – no.42. – pp. 421-424.
5. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Проблемы моделирования переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – ч.2. – С. 65-70.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
7. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
8. Zhao C., Ren Z., Zhou X., Wen B. The Online Monitoring of the Dynamic Characteristics for an Induction Motor and Gearbox Transmission System // Second International Conference on Innovative Computing, Informatio and Control (ICICIC 2007). – Kumamoto, 2007. – pp. 532-532. doi: 10.1109/ICICIC.2007.582.
9. Evon S., Schiferl R. Direct-drive induction motors: using an induction motor as an alternative to a motor with reducer // IEEE Industry Applications Magazine. – 2005. – vol.11. – no.4. – pp. 45-51. doi: 10.1109/MIA.2005.1458276.
10. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation // 2016 IEEE ANDESCON. – 2016. – pp. 1-4. doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836207.
11. Shwehdi M.H., Hye A., Quasem M.A. Economic analysis and evaluation of transformer and induction motor losses costs using PC software // 1993 (25th) Southeastern Symposium on System Theory. – 1993. – pp. 63-67. doi: 10.1109/SSST.1993.522743.
12. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Анализ потерь и теплового состояния асинхронного двигателя при частотном управлении // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 1999. – №1. – С. 31-36.
13. Петрушин В.С., Бендахман Бухалфа, Якимец А. М., Каленик О. В. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №2. – С. 21-23. doi: 10.2098/2074-272X.2010.02.06.
14. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. Баланс энергий в силовых цепях. К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
15. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського. – 2007. – №3(44). – Частина 1. – С. 66-71.
16. Орловский И.А. О мощности в электрической цепи с вентилем // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2013. – Вип.13. – т.4. – С. 141-150.

17. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

REFERENCES

1. IEC 60034-1:2004. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
2. Bespalov V.Y., Dunaykina E.A. Moshchinskii Y.A. Nestatsionarnyye teplovye raschety v elektricheskikh mashinah [Unsteady heat calculations in electrical machines]. Moscow, MEI Publ., 1987. 72 p. (Rus).
3. Dunaykina E.A. Razrabotka modifikatsii asinkhronnykh dvigatelei edinoi serii 4A (H = 56-132 mm) dlia kratkovremennykh rezhimov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development modifications asynchronous motors single series 4A (H = 56-132 mm) for the short-term operation. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1986. 20 p. (Rus).
4. Nyein Nyein Soe, Thet Thet Han Yee, Soe Sandar Aung. Dynamic Modeling and Simulation of Three-phase Small Power Induction Motor. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, no.42, pp. 421-424.
5. Verbovoi A.P., Verbovoi P.F. Problems of modeling of transient electromagnetic processes in asynchronous machines. Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering», 2004, chapter 2, pp. 65-70. (Rus).
6. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Equipment of the electrode plants mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, High School Publ., 1987. 248 p. (Rus).
7. Petrushin V.S. Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: Uchebnoe posobie [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. (Rus).
8. Zhao C., Ren Z., Zhou X., Wen B. The Online Monitoring of the Dynamic Characteristics for an Induction Motor and Gearbox Transmission System. Second International Conference on Innovative Computing, Informatio and Control (ICICIC 2007), Kumamoto, 2007. pp. 532-532. doi: 10.1109/ICICIC.2007.582.
9. Evon S., Schiferl R. Direct-drive induction motors: using an induction motor as an alternative to a motor with reducer. IEEE Industry Applications Magazine, 2005, vol.11, no.4, pp. 45-51. doi: 10.1109/MIA.2005.1458276.
10. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation. 2016 IEEE ANDESCON, pp. 1-4. doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836207.
11. Shwehdi M.H., Hye A., Quasem M.A. Economic analysis and evaluation of transformer and induction motor losses costs using PC software. 1993 (25th) Southeastern Symposium on System Theory, pp. 63-67. doi: 10.1109/SSST.1993.522743.
12. Petrushin V.S., Ryabinin S.V., Yakimets A.M. Analysis of losses and thermal state of an asynchronous motor in frequency control. Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1999, no.1, pp. 31-36. (Rus).
13. Petrushin V.S., Bendahmane Boukhalfa, Yakimets A.M., Kalenik O.V. Influence of magnetic core steel saturation and rotor current displacement on dynamic characteristics of adjustable-speed induction motors. Electrical Engineering & Electromechanics, 2010, no.2, pp. 21-23. (Rus). doi: 10.2098/2074-272X.2010.02.06.
14. Tonkal V.E., Novoseltsev A.V., Denisiuk S.P. Balans energii v silovykh tsepiakh [Balance of energies in power circuits]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 312 p. (Rus).

15. Rodkin D.I. The balance of the components of the instantaneous power of polyharmonic signals. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2007, no.3(44), part 1, pp. 66-71. (Rus).

16. Orlovskii I.A. On the power in an electrical circuit with a valve. *Works of the Tavria State Agrotechnological University*, 2013, no.13, vol.4, pp. 141-150.

17. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Yakimets, A.M. *Programmyj produkt «DIMASDrive». Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnyh korotkozamknytyh dvigatelej sistem reguliruemogo elektroprivoda* [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065. (Ukr).

Поступила (received) 29.08.2018

Петрушин Виктор Сергеевич¹, д.т.н., проф.,
Плоткин Юрий Романович², к.т.н., проф.,
Еноктаев Ростислав Николаевич¹, аспирант,
Прокопенко Никита Сергеевич¹, магистрант,
¹ Одесский национальный политехнический университет,
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +380 48 7058494,
e-mail: victor_petrushin@ukr.net, rostik-enok@ukr.net,
nikita_prokopenko@yahoo.com

² HWR Berlin,
Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany,
тел/phone +49 (0)30 30877-2443,
e-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

V.S. Petrushin¹, Y.R. Plotkin², R.N. Yenoktaiev¹, N.S. Prokopenko¹

¹ Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

² HWR Berlin,
Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany.

Research of dynamic characteristics of induction motors in electric drives with matching transformer and reducer.

Introduction. The variety of electric drives, the performance characteristics of which correspond to the set requirements of consumers while ensuring reliable and economical operation for a certain time resource, characterizes the variety of circuit solutions, including using matching transformers and reducers. **Problem.** The use of matching transformers and reducers units significantly changes the performance characteristics of the electric drive. Most articles are devoted to modeling an electric drive without such elements. It is advisable to consider simulations of electric drives using these elements. **Methodology.** In the models of matching transformers and reducers, the initial data are used, which determine both the functional properties and the mass and size parameters. The latter provide an opportunity to consider the economic aspects of the electric drive. For the correct calculation of the energy balance of the electric drive, the efficiency of the elements under consideration is taken into account. **Results.** The use of the developed algorithms for modeling the dynamic modes of two induction motors in electric drives operating on a specific load diagram, with the connection of a matching transformer and reducers, is considered. Dependencies of efficiency and power factor of motors have allowed to determine the medium cyclic energy indicators. The mass- size and cost indicators of variants of electric drives were found, which made it possible to calculate the average cyclic reduced costs of electric drives. **Practical value.** The possibility of choosing the best variant of the drive based on various indicators, including the minimum amount of energy losses per year, is substantiated. References 17, tables 2, figures 8.

Key words: induction motor, load cyclogram, reducer, transformer, mathematical model, average cyclic criteria, energy indicators, reduced costs.