

В.А. Волков, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, ГВУЗ " Національний горний університет")

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ В ПУСКТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ СКОРОСТЬЮ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКОЙ

Анотація. Запропоновано і досліджено близька до оптимальної (названа «квазіоптимальний») траєкторія зміни швидкості частотнорегульованого асинхронного двигуна (ЧРАД) з вентиляторним навантаженням, при якій забезпечуються найменші (в порівнянні з іншими відомими траєкторіями зміни швидкості) електромагнітні втрати енергії цього двигуна з даним навантаженням в пускогальмівних режимах при будь-яких значеннях часів розгону і гальмування. Уточнено аналітичні залежності для модуля статорної струму і основних електромагнітних втрат потужності ЧРАД, в яких враховуються електромагнітні втрати в сталі двигуна. Проведено дослідження основних електромагнітних втрат енергії для ЧРАД з вентиляторним навантаженням при різних значеннях часів розгону і гальмування стосовно різних видів (лінійного, параболічного і квазіоптимального) траєкторій швидкості. Виявлено існування оптимальних значень часів розгону і гальмування, при яких для згаданих різних траєкторій швидкості двигуна вказані втрати енергії ЧРАД з вентиляторної навантаженням в пускогальмівних режимах мінімальні.

Ключові слова: частотне регулювання, асинхронний двигун, пускогальмівні режими, електромагнітні втрати енергії.

Аннотация. Предложена и исследована близкая к оптимальной (названная «квазиоптимальной») траектория изменения скорости частотнорегулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД) с вентиляторной нагрузкой, при которой обеспечиваются наименьшие (в сравнении с другими известными траекториями изменения скорости) электромагнитные потери энергии этого двигателя с данной нагрузкой в пускотормозных режимах при любых значениях времен разгона и торможения. Уточнены аналитические зависимости для модуля статорного тока и основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД, в которых учитываются электромагнитные потери в стали двигателя. Проведено исследование основных электромагнитных потерь энергии для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при разных значениях времен разгона и торможения применительно к различным видам (линейной, параболической и квазиоптимальной) траекторий скорости. Выведено существование оптимальных значений времен разгона и торможения, при которых для упомянутых разных траекторий скорости двигателя указанные потери энергии ЧРАД с вентиляторной нагрузкой в пускотормозных режимах минимальны.

Ключевые слова: частотное регулирование, асинхронный двигатель, пускотормозные режимы, электромагнитные потери энергии.

Abstract. A near-optimal (called "quasi-optimal") trajectory of the change in the speed of a frequency-controlled asynchronous engine (FCAE) with a fan load, which ensures the lowest (in comparison with other known velocity changes trajectories), the electromagnetic energy losses of this engine with a given load in the starting braking modes are proposed and investigated at any values of acceleration and deceleration times. The analytical dependencies for the modulus of stator current and the main electromagnetic losses of the FCAE are specified, which take into account the electromagnetic losses in the engine steel. The study of the main electromagnetic energy losses for FCAE with fan load at different values of acceleration and deceleration times for various types of (linear, parabolic and quasi-optimal) velocity trajectories was carried out. The existence of optimal values of acceleration and deceleration times for which the indicated losses of energy for the mentioned different engine speed trajectories with fan load in the starting braking modes are minimal.

Keywords: frequency control, asynchronous engine, starting braking regimes, electromagnetic energy losses.

Введение. Принимая во внимание широкое внедрение в последние годы в мире и в Украине частотнорегулируемых асинхронных электроприводов (ЧРАЭП) и происходящее удорожание электрической энергии, становится актуальной и востребованной практикой задача энергосбережения в указанных электроприводах. При этом одно из ныне существующих распространенных и весьма перспективных в будущем направлений применения таких частотнорегулируемых электроприводов приходится на центробежные вентиляторы и дымососы, в которых частотное регулирование предназначено не только для экономичного регулирования их производительности в установившихся режимах, но и для осуществле-

ния их плавного пуска в динамических режимах [1,2]. Необходимость последнего для средней и большой мощности указанных типов нагнетателей (отличающихся высокой инерционностью и устанавливаемых, как правило, непосредственно на валу двигателя) обусловлена «тяжелыми» прямыми пусками их приводных асинхронных двигателей. А именно, такие пуски рассматриваемых нагнетателей характеризуются увеличенной продолжительностью времен разгона и, как следствие, повышенными непроизводительными электромагнитными потерями энергии в приводе двигателя, что может привести к недопустимому перегреву асинхронного двигателя при прямом пуске и на практике существенно ограничивает допустимое количество пусков (до нескольких раз в сутки) указанных нагнетателей.

Наиболее эффективный подход к снижению непроизводительных потерь электроэнергии, которому посвящена основная часть известных публикаций в отечественной и зарубежной литературе (например, [3 – 7]), относится к установившимся режимам работы частотнорегулируемых асинхронных двигателей (ЧРАД) и основан на использовании в них оптимальных законов частотного управления (по минимуму электромагнитных потерь мощности, по минимуму статорного тока, по минимуму потребляемой активной мощности и др.) асинхронного двигателя. Только в относительно небольшой части существующих известных публикаций [8 – 12] исследуются вопросы энергосбережения в динамических режимах разгона и торможения применительно для ЧРАД, работающих с постоянным статическим моментом в интенсивных пускотормозных режимах (например, на прокатных станах, подъемно-транспортных механизмах).

Лишь совсем единичные работы [8, 9] рассматривают вопросы энергосбережения в динамических режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой. К сожалению, в приведенных монографиях Ю.П. Петрова отмеченные исследования энергосбережения в частотнорегулируемых асинхронных электроприводах центробежных вентиляторов выполнены неполно. А именно, во-первых, в динамических режимах разгона минимизируются (за счет предложенной в этих монографиях параболической траектории изменения скорости двигателя во времени) только электрические потери энергии в статорной и роторной обмотках ЧРАД, а потери в стали двигателя совсем не учитываются. Во-вторых, остались совершенно нерассмотренными вопросы энергосберегающего управления ЧРАД с вентиляторной нагрузкой в режиме торможения. В-третьих, остался неисследованным вопрос существования оптимальных значений времен разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, при которых электрические (или электромагнитные) потери энергии в пускотормозных режимах становятся минимальными. В-четвертых, не проведены исследования электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД (составляющих, как известно, большую часть из общих потерь мощности и энергии асинхронного двигателя [13]), а также отсутствует сопоставительное сравнение предложенной в [8, 9] параболической тахограммы с другими (например, линейной) траекториями изменения скорости, применяющимися в настоящее время на практике.

Цель работы. Разработка и исследование энергосберегающего управления скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой, которое обеспечивает минимизацию основных электромагнитных потерь энергии двигателя в пускотормозных режимах, а также – осуществление сопоставительного сравнения разработанного управления с другими известными (линейным, параболическим) видами управления скоростью этого двигателя.

При последующих исследованиях энергосберегающего управления ЧРАД примем допущения:

- пуски и торможения вентилятора (дымососа) происходят при полностью открытом шибере [2];
- учитывалось общепринятое идеализированное представление асинхронного двигателя [4, 7] при одновременном учете в нем потерь мощности в стали (присущих неидеализированному двигателю) [10];
- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов в пускотормозных режимах [8 – 10];
- автоматической системой регулирования электроприводом поддерживается наиболее распространенный для векторного управления закон частотного управления: при постоянстве модуля Ψ_r потокоцепления ротора двигателя, равном его номинальному значению Ψ_m (т.е. при $\Psi_r = \Psi_m = const$) [4, 7];
- значения момента сопротивления M_c вентиляторной нагрузки изменяются в квадратичной зависимости от скорости ω вентилятора или дымососа (установленных непосредственно на валу двигателя);
- значение момента инерции J привода принимается неизменным и равным сумме: $J = J_r + J_b$ моментов инерции ротора J_r двигателя и вентилятора (дымососа) J_b ;
- пренебрегаем механическими потерями мощности двигателя (составляющими очень малую величину – при номинальной скорости от 1 до 5 % от номинальных общих потерь мощности двигателя [13]), которые затрачиваются на преодоление трения в подшипниках и приведение в движение устанавливаемого на валу двигателя охлаждающего вентилятора); механические потери мощности уменьшаются прямо пропорционально квадрату скорости двигателя при ее снижении вниз от номинального значения;

Энергобережения та энергоефективність

- все аналитические зависимости и расчеты приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц [4, 7];

- исследованию подлежали режимы: разгона ЧРАД от нулевой до максимальной ω_M скорости и торможения от максимальной скорости ω_M до нулевой скорости (где при расчетах значение ω_M в относительных единицах принималось равным единице: $\omega_M = 1$ о.е., что, как известно, соответствует в относительных единицах синхронной скорости этого электродвигателя [4, 7]);

- последующие исследования проводились для предложенного энергосберегающего управления в сравнении с известными (линейным и параболическим) видами изменения скорости ЧРАД применительно к параметрам: асинхронных электродвигателей типов А03-400М-У2 мощностью 315 кВт и АДО-2000-6000-12У1 мощностью 2000 кВт, а также центробежного вентилятора типа ВМ-17 [19] и дымососа типа ДОД-31,5 ФГМ [20] (основные паспортные данные которых приведены в табл. 1).

Таблица 1

Паспортные данные двигателей, центробежного вентилятора ВМ-17 и дымососа ДОД 31,5 ФГМ

Название параметра	Единицы измерения	Значения параметра	
		А03-400М-У2	АДО-2000-6000-12У1
I Электродвигатели			
Номинальная мощность	кВт	315	2000
Номинальная скорость	об/мин.	1485	497,5
Номинальное линейное напряжение	В	660	6000
Номинальный фазный ток	А	323	259,5
Номинальный коэффициент полезного действия	%	94	96,3
Номинальный коэффициент мощности	о.е.	0,91	0,77
Пусковая перегрузочная способность по моменту	о.е.	0,9	1,0
Максимальная перегрузочная способность по моменту	о.е.	2	2,5
Кратность пускового тока	о.е.	7	5,5
Активное сопротивление статорной обмотки	10^{-3} о.е.	18,09	8,989
Активное сопротивление роторной обмотки (приведенной к статору)	10^{-3} о.е.	10,73	5,543
Индуктивность намагничивания	о.е.	4,50	3,582
Индуктивность рассеяния статора	о.е.	0,1605	0,0633
Индуктивность рассеяния ротора	о.е.	0,1264	0,0603
Момент инерции ротора	кг·м ²	7,25	196,5
II Центробежный вентилятор и дымосос			
		ВМ-17	ДОД 31,5 ФГМ
Номинальная скорость	об/мин.	1500	495
Номинальная производительность	10 ³ м ³ /ч	58	985000
Номинальное полное давление	кгс/м ²	9383	500
Номинальная мощность на валу двигателя	кВт	177	1790
Максимальный коэффициент полезного действия	%	82	80,5
Диаметр рабочего колеса	м	1,7	3,176
Момент инерции ротора	кг·м ²	190	5375

Для нахождения и анализа основных электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД при векторном управлении с постоянством потокоцепления ротора двигателя воспользуемся зависимостью [10]:

$$\Delta P_{em} \approx a + b \cdot (M_c + J\omega')^2 + c \cdot \omega^{1,3}, \quad (1)$$

в которой постоянные коэффициенты рассчитываются через параметры ЧРАД из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} a &= (\Psi_r / L_m)^2 \cdot (R_s + 0,005 \cdot P_n / \eta_n), \\ b &= (R_s + k_r^2 R_r + 0,005 \cdot P_n / \eta_n) / (k_r^2 \Psi_r^2), \quad c = \Delta P_{cmn} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) используются следующие обозначения: M_c и J – приведенные к валу двигателя соответственно момент сопротивления нагрузки и момент инерции привода; Ψ_r и ω – модуль потокосцепления ротора и угловая частота вращения (скорость) ротора двигателя соответственно; R_s и R_r – активные сопротивления соответственно статорной и роторной (приведенной к статору) фазных обмоток двигателя; P_n и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя; ΔP_{cmn} и k_r – номинальное значение потерь в стали и коэффициент связи ротора двигателя соответственно; $\omega' = d\omega/dt$ – первая производная скорости по времени. При этом посредством слагаемого, равного $0,005 \cdot P_n / \eta_n$ и содержащегося в первой и второй формулах из (2), учитываются в составе потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} в том числе добавочные потери мощности асинхронного двигателя [13].

Подставив в (1) значение момента сопротивления M_c для вентиляторной нагрузки [2, 14]:

$$M_c = M_{cn} \cdot (\omega / \omega_n)^2, \quad (3)$$

получим аналитическую зависимость для расчета потерь электромагнитной мощности в ЧРАД, приводящем в движение центробежный вентилятор или дымосос:

$$\Delta P_{em} \approx a + b \cdot (q \cdot \omega^2 + J\omega')^2 + c \cdot \omega^{1,3}. \quad (4)$$

При этом значение постоянного коэффициента q в (4) находится через номинальные значения момента сопротивления M_{cn} и мощности P_{cn} вентиляторной нагрузки (соответствующие номинальной скорости ω_n вентилятора или дымососа) из соотношений [2, 14]:

$$q = M_{cn} / \omega_n^2 \quad \text{и} \quad M_{cn} = P_{cn} / \omega_n. \quad (5)$$

После подстановки потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} из (4) в соотношения:

$$\Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{em} \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_m = \int_0^{t_m} \Delta P_{em} \cdot dt, \quad (6)$$

получим из (6) аналитические выражения для расчета основных электромагнитных потерь энергии (ОЭПЭ) рассматриваемого двигателя с вентиляторной нагрузкой соответственно при разгоне и торможении (где t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения соответственно).

На первом этапе найдем оптимальную траекторию скорости ЧРАД (приводящего в движение вентиляторную нагрузку), при которой значения ОЭПЭ двигателя в пускотормозных режимах минимальны. Как известно из теории вариационного исчисления, оптимизация (минимизация) основных электромагнитных потерь энергии ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при разгоне и торможении:

$$\Delta W_p = \Delta W_p^o = \min \quad \text{и} \quad \Delta W_m = \Delta W_m^o = \min, \quad (7)$$

описываемых математически интегральными зависимостями (6) от функции ΔP_{em} из (4), зависящий от переменных величин: скорости ω и ее производной скорости ω' по времени, – осуществляется при временных функциях для скорости ω , отвечающих уравнению Эйлера [15]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} \cdot \omega'' + \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial \omega'} + \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega} = 0, \quad (8)$$

где $\omega'' = d^2\omega/d^2t$ – вторая производная скорости по времени.

После вычисления входящих в уравнение Эйлера (8) частных производных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega} &= b \cdot [4q^2 \cdot \omega^3 + 4qJ\omega \cdot \omega'] + 1,3c \cdot \omega^{0,3}, & \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial t} &= 0, \\ \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega'} &= b \cdot [2qJ \cdot \omega^2 + 4J^2 \omega'], & \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} &= 2bJ^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

и их подстановки в уравнение (8) найдем математическое выражение для этого уравнения применительно к пускотормозным режимам ЧРАД с вентиляторной нагрузкой:

$$\omega'' = N \cdot \omega^3 + K \cdot \omega^{0,3}, \quad (10)$$

где постоянные коэффициенты N и K рассчитываются с учетом (5) и (9) из соотношений:

$$N = 2q/J^2 = 2M_{cn}/J^2\omega_n^2 = 2P_{cn}/J^2\omega_n^3 \quad \text{и} \quad K = 1,3 \cdot c/2bJ^2. \quad (11)$$

Анализ вида полученного уравнения (10) свидетельствует о том, что оно является нелинейным дифференциальным уравнением (ДУ) второго порядка, в котором в левой части присутствует вторая производная ω'' скорости, а в правой части содержится сумма двух нелинейных (то есть, с показателями, не равными единице) степенных функций от переменной ω , характеризующихся следующими значениями этих показателей: 3 и 0,3. Как известно, нелинейное ДУ не имеет точного аналитического решения [16] и для его численного решения используются различные существующие итерационные методы [17].

В предложенном исследовании численное решение нелинейного ДУ (10) применительно к значениям постоянных коэффициентов $N = 1,9156 \cdot 10^{-8}$ о.е. и $K = 2,0194 \cdot 10^{-8}$ о.е. (соответствующих параметрам электродвигателя АОЗ-400М-У2 и центробежного вентилятора ВМ-17 из табл.1) выполнено методом Рунге-Кутты [17] и построено для режимов разгона (за время $t_p = 1,57 \cdot 10^3$ о.е. = 50с от нулевой до максимальной скорости $\omega_M = 1$ о.е.) и торможения (за время $t_m = 1,57 \cdot 10^3$ о.е. = 50с от максимальной $\omega_M = 1$ о.е. до нулевой скорости) сплошной линией на рис.1,а,б. Только обозначенные буквой «О» и показанные сплошной линией на этом рисунке траектории изменения скорости (тахограммы) ЧРАД из всех других возможных их видов являются оптимальными, так как лишь они, согласно уравнению Эйлера (8), обеспечивают для ЧРАД минимально возможные значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения.

На *втором этапе* для режимов разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой (применительно к параметрам двигателя АОЗ-400М-У2 и вентилятора ВМ-17) осуществим интерполяцию рассчитанных численным методом на первом этапе оптимальных тахограмм разгона и торможения (показанных на рис.1,а,б сплошной линией и обозначенных буквой «О») аналитическими зависимостями, характеризующимися наименьшими среднеквадратичными отклонениями оптимальных тахограмм.

В начале этих исследований задавались разные известные математические функции (степенная, показательная, гиперболическая, тригонометрическая и логарифмическая), вид у которых похож на вид оптимальной тахограммы «О» для ЧРАД на рис.1,а,б. При идентичных начальных и конечных значениях скоростей и при одинаковых временах $t_{p,m}$ разгона (или торможения) расхождение интерполирующих аналитических функций (характеризующихся текущими значениями ω) от оптимальной тахограммы ЧРАД (характеризующейся текущими значениями ω^*) оценивалось по величине среднеквадратичного отклонения, определяемого из соотношения:

$$\delta = \left[\frac{1}{t_{p,m}} \int_0^{t_{p,m}} (\omega - \omega^*)^2 \cdot dt \right]^{0,5}. \quad (12)$$

Результатами приведенных исследований установлено, что из всех перечисленных известных интерполирующих функций наилучшим совпадением с оптимальным численным решением (показанным кривыми «О» на рис.1,а,б) характеризуется общее аналитическое решение для нелинейного ДУ (10) в виде функции гиперболического синуса с варьируемым значением коэффициента ξ в аргументе:

$$\omega = C_1 \cdot sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t + C_2), \quad (13)$$

где C_1 и C_2 – постоянные величины, определяемые из начальных и конечных значений для скорости ЧРАД в рассматриваемых пускотормозных режимах; t – текущее время, изменяемое в пределах: $0 \leq t \leq t_p$ – при разгоне и $0 \leq t \leq t_m$ – при торможении.

Полученные из (13) частные решения, соответствующие принятым ранее начальным и конечным значениям скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой (идентичным ранее рассмотренным для точного численного решения «О» на рис.1,а,б), имеют следующий вид:

$$\omega = \omega_M \cdot \left[\frac{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right] \quad \text{и} \quad \omega = \omega_M \cdot \left\{ \frac{\text{sh}[\xi \cdot \sqrt{K} \cdot (t_m - t)]}{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \quad (14)$$

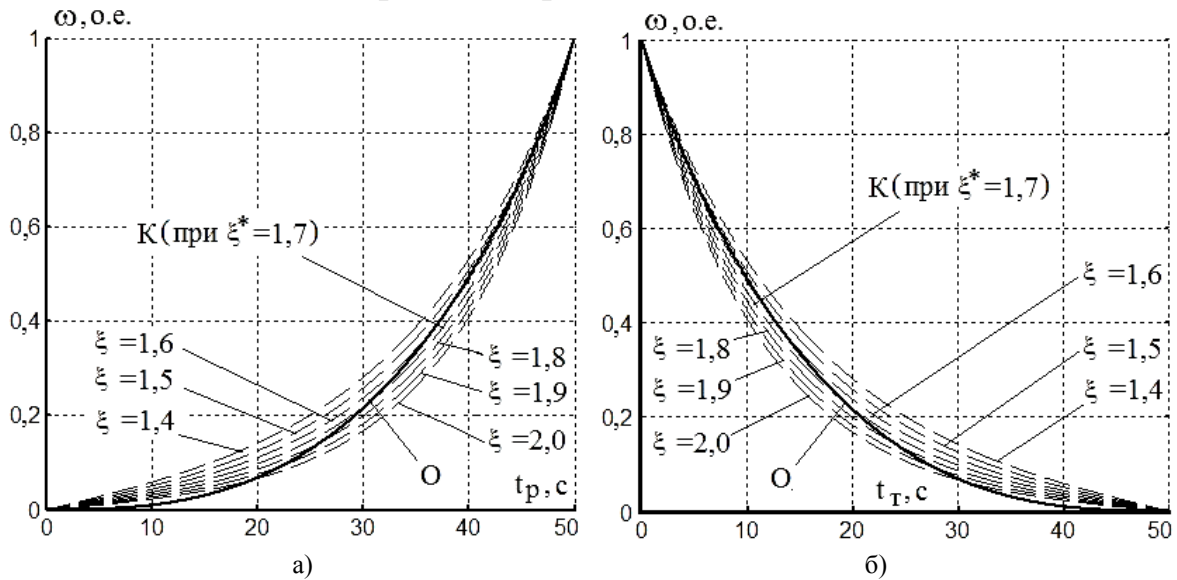


Рисунок 1. Графические зависимости для: оптимальной (О), квазиоптимальной (К) при $\xi = \xi^*$ и в виде функции гиперболического синуса тахограмм (последние показаны пунктиром при разных значениях поправочного коэффициента ξ) для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой: а – при разгоне, б – при торможении

соответственно при разгоне или торможении, где ω_M – максимальные значения скорости двигателя (соответствующие окончанию разгона или началу торможения); начальное значение скорости при разгоне и конечное значение скорости при торможении приняты равными нулю; t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения соответственно.

При варьировании значения поправочного коэффициента ξ в диапазоне от 1,4 до 1,8 о.е. рассчитаны из (14) для режимов разгона и торможения (при $t_p = t_m = 50$ с) текущие значения скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, интерполированные функциями гиперболического синуса и показанные пунктирными графиками на рис.1,а,б. Для каждого из этих графиков вычислены среднеквадратичные отклонения (приведенные в табл. 2) от оптимальной тахограммы «О» скорости, показанной сплошной линией на этих рисунках.

Таблица 2

Значения среднеквадратичного отклонения между оптимальной и интерполированной в виде гиперболического синуса тахограммами ЧРАД в зависимости от поправочного коэффициента ξ

Величина, ед. измер.	Значение величины							ξ^*
ξ , о.е.	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	1,70
δ , %	5,2190	3,7632	2,6505	2,2059	2,6120	3,4843	4,4917	2.2059

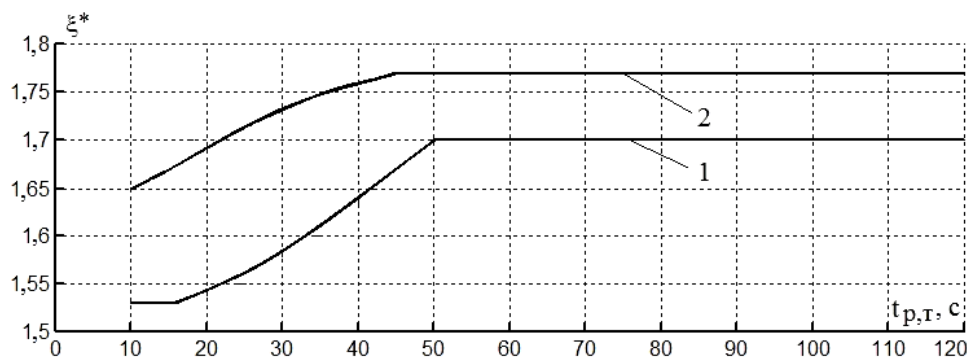
Виявлено, що існує таке оптимальне значення ξ^* поправочного коефіцієнта ξ (для рис.1,а,б значення $\xi^* = 1,70$), при якому обчислене з (12) середньквдратичне відхилення мінімально (для вказаного рисунка: $\delta = 2,2\%$). Вказана (найкращим чином збігаюча з оптимальною кривою швидкості «О» на рис.1, а, б) тахограма ЧРАД, що відповідає оптимальному значенню поправочного коефіцієнта $\xi = \xi^*$, названа «квазіоптимальною» і позначена на малюнку літерою «К»).

Були виконані аналітичні розрахунки оптимальних значень ξ^* поправочного коефіцієнта ξ при зміні часів розгону t_p і гальмування t_m двигачів типу А03-400М-У2 (з центробіжним вентилятором ВМ-17) і АОД-2000-6000-12У1 (з дымососом ДОД-31,5ФГМ) в діапазоні тривалостей від 10 с до 120 с, результати яких наведені в табл. 3. По отриманих з табл. 3 даним побудовані на рис. 2 графічні залежності, що характеризують зміну оптимального значення ξ^* поправочного коефіцієнта ξ для квазіоптимальних тахограм ЧРАД з вентиляторною навантажкою при різних часах розгону і гальмування.

Таблиця 3

Залежність оптимальних значень поправочних коефіцієнтів ξ^* при квазіоптимальній траєкторії швидкості від тривалості часів розгону (гальмування)

Назва величини, одиниця виміру	Значення величини							
	I Електродвигач А03-400М-У2 з центробіжним вентилятором ВМ-17							
Час $t_{p,m}$, с	10	15	20	25	30	35	40	45
Коефіцієнт ξ^* , о.е.	1,53	1,53	1,54	1,57	1,58	1,61	1,64	1,67
Час $t_{p,m}$, с	50	60	70	80	90	100	110	120
Коефіцієнт ξ^* , о.е.	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
II Електродвигач АОД-2000-6000-12У1 з дымососом ДОД-31,5 ФГМ								
Час $t_{p,m}$, с	10	15	20	25	30	35	40	45
Коефіцієнт ξ^* , о.е.	1,65	1,67	1,69	1,72	1,73	1,75	1,76	1,77
Час $t_{p,m}$, с	50	60	70	80	90	100	110	120
Коефіцієнт ξ^* , о.е.	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77



**Рисунки 2. Залежності при квазіоптимальних тахограмах оптимального значення ξ^* поправочного коефіцієнта від часу розгону (або гальмування):
1 – для двигача А03-400М-У2 з вентилятором ВМ-17;
2 – для двигача АОД-2000-6000-12У1 з дымососом ДОД-31,5ФГМ.**

При цьому виявлено, що в згаданому широкому діапазоні зміни тривалостей часів розгону і гальмування ЧРАД з вентиляторною навантажкою середньквдратичні відхилення між поточними значеннями швидкостей, розрахованими з аналітичних залежностей (14) при оптимальних значеннях коефіцієнта ξ^* , і поточним оптимальним значенням швидкості двигача (заданим кривими «О» на рис.1,а,б) не перевищують: 2,2% для ВМ-17 або 1,25% для ДОД-31,5ФГМ, що на практиці, очевидно, допустимо для інженерних розрахунків. Отримані при оптимальних значеннях ξ^* поправочного коефіцієнта траєкторії зміни швидкості:

$$\omega = \omega_M \cdot \left[\frac{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right], \quad \omega = \omega_M \cdot \left\{ \frac{\text{sh}[\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot (t_m - t)]}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \quad (15)$$

и реализующее их автоматическое управление предложено называть «квазиоптимальными» соответственно тахограммами и управлением в пускотормозных режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой.

В качестве иллюстрации вида полученных квазиоптимальных тахограмм (на примере электродвигателя А03-400М-У2 с центробежным вентилятором ВМ-17) приведены на рис. 3 рассчитанные квазиоптимальные тахограммы (обозначенные буквой «К») для времен разгона и торможения, равных: 30 с; 60 с; 90 с и 120 с. Для сравнения на этих же рисунках при указанных значениях длительностей времен разгона и торможения представлены тахограммы для тех же двигателя и вентилятора при линейном и параболическом видах изменения скорости от времени (обозначенные соответственно буквами «Л» и «П»).

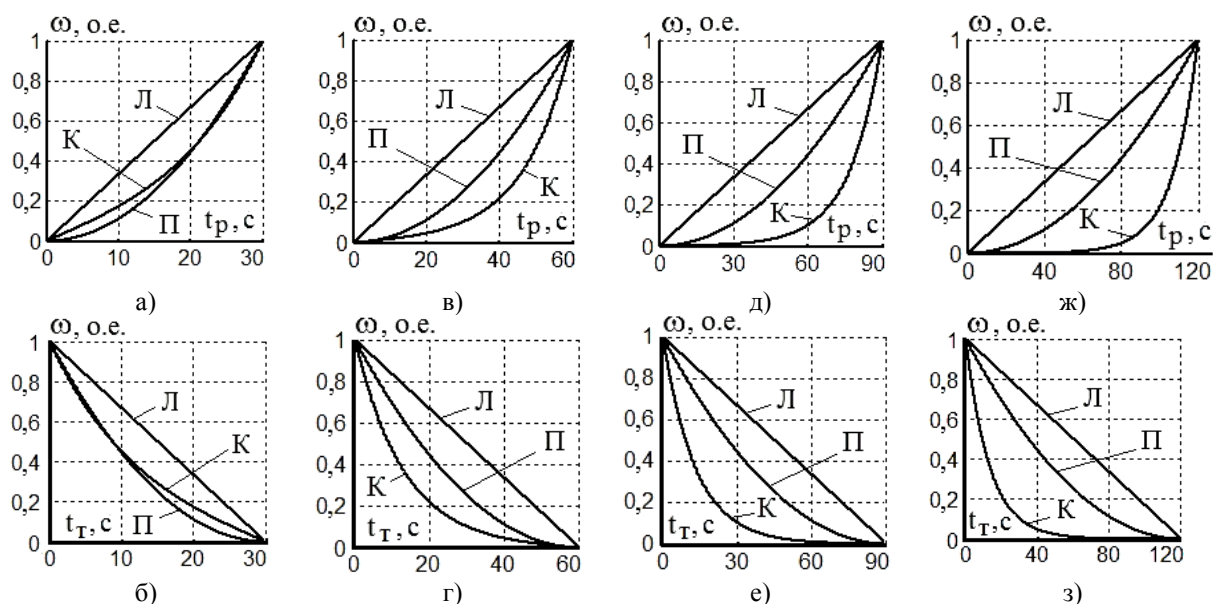


Рисунок 3. Квазиоптимальные тахограммы разгона (а, в, д, ж) и торможения (б, г, е, з) двигателя А03-400М-У2 с центробежным вентилятором ВМ-17 для длительностей времен $t_{p,m}$, равных:

а, б – 30с (при $\xi^* = 1,58$); в,г – 60с (при $\xi^* = 1,7$); д, е – 90с (при $\xi^* = 1,7$); ж, з – 120с (при $\xi^* = 1,7$)

На *третьем этапе* выполним анализ приближенного математического выражения (1) для вычисления электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД и уточним его. Важным достоинством выражения (1) является относительная его простота, которая позволяет за счет этого получить, в свою очередь, простой вид (10) уравнения Эйлера и найти его приближенное общее (13) и частные (15) решения.

Однако, рассматриваемое выражение (1) характеризуется определенной погрешностью при расчете упомянутых электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД, так как в указанном выражении не учитывается дополнительная составляющая электрических потерь мощности для статорной обмотки, вызванная передачей через нее энергии, затрачиваемой в виде потерь мощности ΔP_{cm} в стали двигателя.

Проиллюстрируем выше изложенное с использованием «Т»-образной схемы замещения ЧРАД из [4], представленной на рис. 4 и составленной в обобщенных векторах (статорного напряжения \bar{U}_s , статорного \bar{I}_s и роторного \bar{I}_r токов, результирующего тока намагничивания $\bar{I}_{m\Sigma}$, электродвижущих сил (ЭДС): намагничивания \bar{E}_m , ротора \bar{E}_p и вращения $j \cdot \omega \cdot \bar{\Psi}_r$). В схеме замещения применены следующие обозначения параметров: R_s и R_r – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора соответственно; L_m и R_m – фазные значения индуктивности намагничивания и эквивалентного активного сопротивления контура намагничивания соответственно; $\bar{\Psi}_r$ и ω – обобщенный вектор потокосцепления ротора и угловая частота вращения (скорость) ротора соответственно; j – мнимая единица.

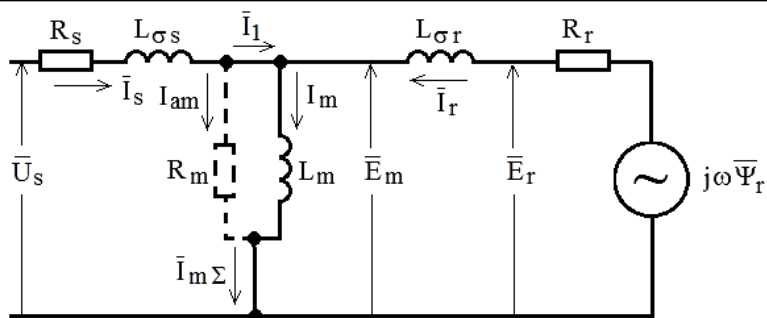


Рис. 4. Схема замещения ЧРАД (соответствующая: без наличия в ней резистора R_m – идеализированному, а с наличием резистора R_m – неидеализированному представлению этого двигателя)

При идеализированном представлении ЧРАД (когда в нем не учитываются потери в стали, которые принимаются равными нулю: $\Delta P_{cm} \approx 0$) в схеме замещения на рис.4 отсутствует резистор R_m и протекающая через этот резистор активная составляющая I_{am} обобщенного вектора $\bar{I}_{m\Sigma}$ тока намагничивания равна нулю ($I_{am} = 0$), а модуль $I_{m\Sigma}$ указанного обобщенного вектора равен реактивной составляющей I_m тока намагничивания ($I_{m\Sigma} = I_m$). Очевидно, для идеализированного ЧРАД соответствует равенство обобщенных векторов: статорного тока \bar{I}_s (потребляемого статорной обмоткой от преобразователя частоты) и статорного тока \bar{I}_1 (равного разности обобщенных векторов намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$ и роторного тока \bar{I}_r на рис. 4).

При неидеализированном ЧРАД (когда в нем осуществляется учет потерь мощности в стали: $\Delta P_{cm} \neq 0$) в схеме замещения на рис.4 присутствует эквивалентный резистор R_m , в котором потери активной мощности (при протекании через него активной составляющей I_{am} вектора намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$) равняются упомянутым текущим потерям мощности в стали двигателя: $R_m \cdot I_{am}^2 = \Delta P_{cm}$.

В связи с нелинейным характером изменения потерь мощности в стали ЧРАД, следующим из последнего слагаемого в (1), а также существующей зависимостью значения активной составляющей I_{am} обобщенного вектора намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$ от модуля E_m обобщенного вектора ЭДС намагничивания \bar{E}_m двигателя (находящегося в виде произведения модуля обобщенного вектора магнитного потока намагничивания Ψ_m и угловой частоты этого вектора ω_1 [4]: $E_m = \omega_1 \cdot \Psi_m$), определение текущего значения сопротивления эквивалентного резистора R_m для ЧРАД в рассматриваемых динамических режимах разгона и торможения чрезвычайно сложно и характеризуется очень громоздкими (препятствующими широкому инженерному использованию на практике) математическими соотношениями.

Предлагается другой способ учета потерь мощности в стали неидеализированного ЧРАД, а именно – путем изменения расчетной зависимости для этих потерь в стали из (1) на более точную [13]:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm.n} \cdot \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{m.n}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{1n}} \right)^{1,3} \quad (16)$$

и введения в исходное расчетное выражение (1) для электромагнитных потерь мощности ЧРАД дополнительной составляющей электрических потерь ΔP_{ed} , вызванных увеличением значения активной (моментобразующей) составляющей I_{sy} обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s неидеализированного ЧРАД. В зависимости (16) используются обозначения: $\Delta P_{cm.n}$ – номинальное значение потерь мощности в стали асинхронного двигателя (соответствующее его номинальной скорости); Ψ_m и $\Psi_{m.n}$ – текущее и номинальное значения модуля обобщенного вектора потока намагничивания ЧРАД; ω_1 и ω_{1n} – текущее и номинальное значения угловой частоты магнитного поля статора двигателя (где $\omega_{1n} = 1$ о.е.).

Последние из упомянутых величин рассчитываются из соотношений [4]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_m &= \sqrt{\Psi_r^2 + k_r^2 \cdot L_{\sigma r}^2 \cdot I_{1y}^2} \quad , & \omega_I &= \omega + \beta \quad , \\ \Psi_{mn} &= \sqrt{\Psi_m^2 + k_r^2 \cdot L_{\sigma r}^2 \cdot I_{1yn}^2} \quad , & \beta &= \frac{k_r \cdot R_r}{\Psi_m} \cdot I_{1y} = \frac{R_r}{\Psi_m^2} \cdot M \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где β – абсолютное скольжение двигателя; I_{1y} и I_{1yn} – соответственно текущее и номинальное (соответствующее номинальному значению электромагнитного момента) значения активной (моментаобразующей) составляющей обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_1 идеализированного ЧРАД; M – электромагнитный момент двигателя (соответствующий идеализированному и неидеализированному ЧРАД).

Для пояснения необходимости расчета дополнительной электрической составляющей $\Delta P_{e,d}$ потерь мощности сначала приведем известное математическое выражение для расчета передаваемой через трехфазную статорную обмотку к ротору идеализированного ЧРАД (когда в нем не учитываются потери в стали) электромагнитной мощности [4]:

$$P_{em} = \omega_I \cdot (k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{1y}) \quad (18)$$

требуемой для создания при заданной угловой частоте ω_I вращения магнитного поля статора необходимого значения электромагнитного момента двигателя [4]:

$$M = k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{1y} \quad (19)$$

Затем рассмотрим неидеализированный ЧРАД, в котором учитываются потери мощности в стали при создании требуемого из (18) значения электромагнитной мощности (передаваемой в ротор). Для получения данного значения из (18) электромагнитной мощности в роторе, очевидно, необходимо в трехфазной статорной обмотке двигателя создать превышающее (на величину потерь в стали) значение P_{em}^* электромагнитной мощности ЧРАД:

$$P_{em}^* = P_{em} + \Delta P_{cm} \quad (20)$$

определяемое аналогично соотношению (18) в виде:

$$P_{em}^* = \omega_I \cdot (k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{sy}) \quad (21)$$

где I_{sy} – активная (моментаобразующая) составляющая обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s для неидеализированного ЧРАД (согласно рис.5).

После подстановки выражений (16), (18) и (21) в (20) определим увеличение ΔI_{sy} активной составляющей обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s , обеспечивающее при поддержании заданного из (18) значения электромагнитной мощности P_{em} в роторе ЧРАД одновременное создание дополнительной активной мощности $\Delta P_{e,d}$ в статорной обмотке, затрачиваемой при передаче мощности ΔP_{cm} (равной потерям мощности в стали двигателя) к эквивалентному резистору R_m в схеме замещения на рис.5:

$$\Delta I_{sy} = I_{sy} - I_{1y} = \frac{\Delta P_{cm,n}}{k_r \Psi_r} \cdot \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{mn}} \right)^2 \cdot \omega_I^{0,3} \quad (22)$$

Приведем математические соотношения для расчета входящих в (22) модулей I_1 и I_s обобщенных векторов \bar{I}_1 и \bar{I}_s статорного тока соответственно идеализированного и неидеализированного ЧРАД:

$$I_1 = [I_{1x}^2 + I_{1y}^2]^{0,5} \quad \text{и} \quad I_s = [I_{1x}^2 + I_{sy}^2]^{0,5} \quad (23)$$

$$\text{где} \quad I_{sy} = I_{1y} + \Delta I_{sy} \quad (24)$$

активная составляющая обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s идеализированного ЧРАД; I_{1x} – равные между собой намагничивающие (потокобразующие) составляющие обобщенных векторов \bar{I}_1 и \bar{I}_s статорного тока идеализированного и идеализированного ЧРАД.

При использовании соотношений (20) – (22) рассчитаем приближенные электромагнитные потери мощности в идеализированном ЧРАД из соотношения [10]:

$$\Delta P_{em} \approx (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot I_1^2 + k^2 R_r \cdot I_{1y}^2 + \Delta P_{cm}, \quad (25)$$

и уточненные электромагнитные потери мощности в идеализированном двигателе из зависимости:

$$\Delta P_{em}^* = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot [I_{1x}^2 + (I_{1y} + \Delta I_{sy})^2] + k^2 R_r \cdot I_{1y}^2 + \Delta P_{cm}. \quad (26)$$

Приняв во внимание известные математические соотношения для электромагнитного момента [18]:

$$M = M_c + J \cdot \omega' , \quad (27)$$

а также для намагничивающей I_{1x} и активной I_{1y} составляющих идеализированного ЧРАД [4]:

$$I_{1x} = \frac{\Psi_r}{L_m} \quad \text{и} \quad I_{1y} = \frac{M}{k_r \Psi_r} , \quad (28)$$

соответствующие закону управления при постоянстве потокосцепления ротора ($\Psi = \Psi_r = const$), преобразуем выражение (26) для уточненных электромагнитных потерь мощности к следующему виду:

$$\Delta P_{em}^* = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot \left[\left(\frac{\Psi_r}{L_m} \right)^2 + \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} + \Delta I_{sy} \right)^2 \right] + \Delta P_{cm}, \quad (29)$$

где в формулах (25), (26) и (29) текущие потери мощности в стали ΔP_{cm} рассчитываются из (16).

В результате вычитания из уточненного значения ΔP_{em}^* электромагнитных потерь идеализированного ЧРАД, рассчитываемых из (29), их приближенного значения ΔP_{em} , вычисленного из (25), определим значения дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e.d}$ в виде:

$$\Delta P_{e.d} = \Delta P_{em}^* - \Delta P_{em} = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot \left[\left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} + \Delta I_{sy} \right)^2 - \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} \right)^2 \right]. \quad (30)$$

С учетом зависимостей (30) и (6) находится через приближенные значения ΔP_{em} электромагнитных потерь мощности идеализированного ЧРАД уточненное значение этих потерь:

$$\Delta P_{em}^* = \Delta P_{em} + \Delta P_{e.d} , \quad (31)$$

а через него – уточненные значения ОЭПЭ данного ЧРАД в пускотормозных режимах:

$$\Delta W_p^* = \int_0^{t_p} \Delta P_{em}^* \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_m^* = \int_0^{t_m} \Delta P_{em}^* \cdot dt. \quad (32)$$

С учетом соотношений (17), (22) и (23), (26), (30) и (31) рассчитывается ряд других зависимостей для пускотормозных режимов:

- квадрат отношения текущего Ψ_m и номинального Ψ_{mn} значений модуля обобщенного вектора намагничивания идеализированного ЧРАД:

$$(\Psi_m/\Psi_{mn})^2 = (\Psi_m^2 + k_r^2 L_{\sigma r}^2 I_{1y}^2) / (\Psi_m^2 + k_r^2 L_{\sigma r}^2 I_{1yn}^2); \quad (33)$$

- отношение текущих значений модулей обобщенных векторов статорного тока ЧРАД:

$$I_s / I_1 = [(I_{1x}^2 + I_{1y}^2) / (I_{1x}^2 + I_{1y}^2)]^{0,5}; \quad (34)$$

- отношение текущего значения дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e,d}$ к уточненным текущим значениям электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{em,p}^*$ или $\Delta P_{em,m}^*$ соответственно при разгоне и торможении неидеализированного ЧРАД:

$$\chi_p = \Delta P_{em,d} / \Delta P_{em,p}^* \quad \text{и} \quad \chi_m = \Delta P_{em,d} / \Delta P_{em,m}^*; \quad (35)$$

- отношение составляющей электромагнитных потерь энергии, вызванной дополнительными электрическими потерями мощности $\Delta P_{e,d}$, к уточненным электромагнитным потерям энергии ΔW_p^* и ΔW_m^* соответственно при разгоне и торможении неидеализированного ЧРАД:

$$\lambda_p = \frac{1}{\Delta W_p^*} \int_0^{t_p} \Delta P_{e,d} \cdot dt \quad \text{и} \quad \lambda_m = \frac{1}{\Delta W_m^*} \int_0^{t_m} \Delta P_{e,d} \cdot dt; \quad (36)$$

- отношение $\Delta P_{em}^* / \Delta P_{em}$ между собой уточненных ΔP_{em}^* и приближенных ΔP_{em} электромагнитных потерь мощности ЧРАД;

- отношение $\Delta W_{p,m}^* / \Delta W_{p,m}$ между собой уточненных $\Delta W_{p,m}^*$ и приближенных $\Delta W_{p,m}$ электромагнитных потерь энергии ЧРАД.

Эти расчетные значения позволяют оценить в зависимостях (22) – (24) и (30) – (32) влияние дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e,d}$ на точность определения модуля I_s обобщенного вектора статорного тока и на точность вычисления уточненных значений электромагнитных потерь мощности ΔP_{em}^* или энергии $\Delta W_{p,m}^*$ неидеализированного ЧРАД.

На четвертом этапе выполним исследования в пускотормозных режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой: ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^*$ при изменении длительностей времен разгона и торможения; электро-механических и энергетических переходных процессов двигателя: ω , I_s , M_c , M , ΔP_{em}^* и $\Delta W_{p,m}^*$; а также упомянутых ранее величин: $(\Psi_r/\Psi_{rn})^2$, I_s / I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m , $\Delta P_{em}^* / \Delta P_{em}$ и $\Delta W_{p,m}^* / \Delta W_{p,m}$.

В частности, на рис.5 построены рассчитанные из (29) графические зависимости ОЭПЭ в режимах разгона и торможения для электродвигателя А03-400М-У2 (нагруженного на центробежный вентилятор ВМ-17) и электродвигателя АОД-2000-6000-12У1 (нагруженного на дымосос Д0Д-31,5ФГМ) при варьировании длительностей времен разгона t_p и торможения t_m применительно к различным траекториям (линейной, параболической и квазиоптимальной) изменения скорости в пускотормозных режимах. Согласно рис.5 указанные зависимости уточненных ОЭПЭ $\Delta W_p^*(t_p)$ и $\Delta W_m^*(t_m)$ характеризуются явным «U»-образным видом, вследствие чего для всех видов (линейного, параболического и квазиоптимального) траекторий скорости ЧРАД существуют определенные значения длительностей времен разгона и торможения, при которых соответствующие им значения ОЭПЭ минимальны. Минимальные значения ОЭПЭ ΔW_p^o , ΔW_m^o и соответствующие им оптимальные значения времен t_p^o и t_m^o приведены в табл. 4.

В той же табл. 4 для сравнения представлены результаты расчета ОЭПЭ для тех же электродвигателей при нечастотных способах пуска и торможения (показанные без скобок для открытого, а в скобках – для закрытого состояния шибера) и соответствующие: прямому пуску (ПП), динамическому торможению (ДТ) и торможению противовключением (ТПВ). Эти расчеты выполнены с использованием известных аналитических зависимостей из [18]: сначала – применительно к трехфазному короткозамкнутому асинхронному двигателю (КАД), работающему на холостом ходу (т.е. при $M_c = 0$):

$$\Delta W_{mn.xx} \approx 0,5J \cdot \omega_M^2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_r}\right), \quad \Delta W_{dm.xx} \approx 0,5J \cdot \omega_M^2 \quad \Delta W_{mn.xx} \approx 1,5J \cdot \omega_M^2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_r}\right), \quad (37)$$

в режимах прямого пуска, динамического торможения и торможения противовключением.

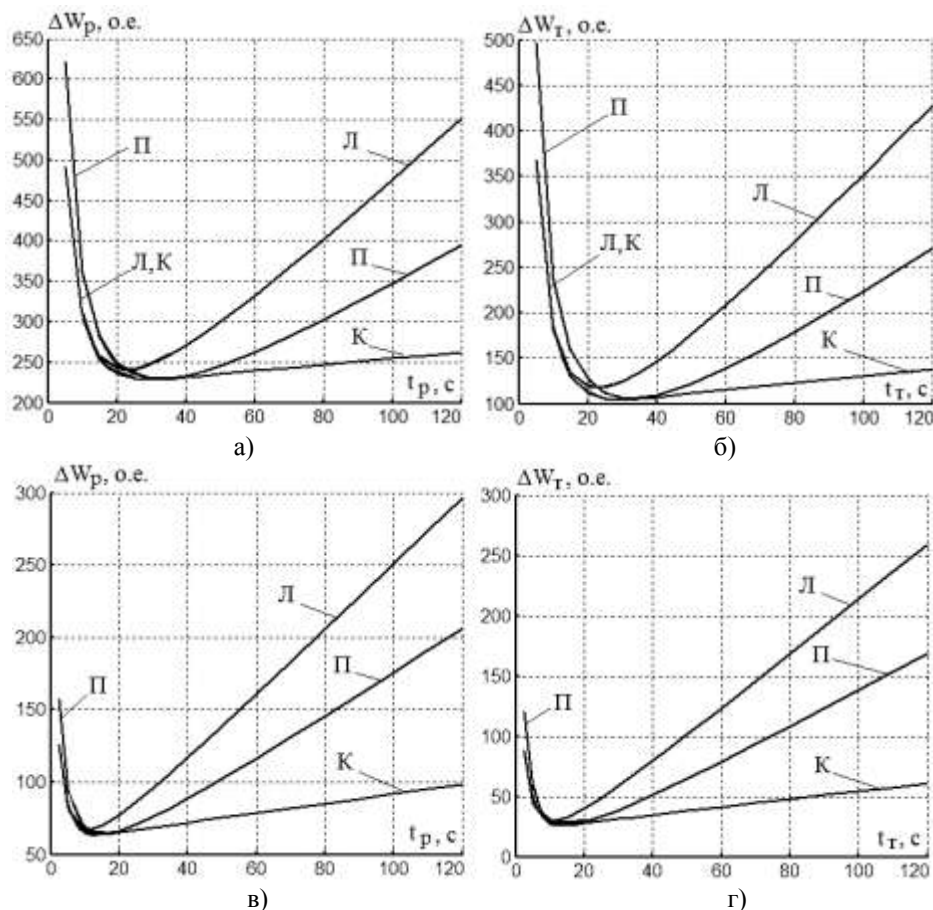


Рис. 5. Зависимости основных потерь электромагнитной энергии (а, б – для электродвигателя А03-400М-У2; в, г – для электродвигателя АОД-2000-6000-12У1) в режимах разгона (а, в) и торможения (б, г) с вентиляторной нагрузкой при линейной (Л), параболической (П) и квазиоптимальной (К) траекториях изменения скорости

Оптимальные значения времен $t_{p,m}$ разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой и соответствующие им минимальные значения $\Delta W_{p,m}^o$ ОЭПЭ

Тип двигателя	Название величин, ед.измер.	Режим	Вид тахограммы			Режим	$t_{p,m}$, с	$\Delta W_{p,m}$, 10^3 о.е.	$\Delta E_{p,m}$, кВтч
			Л	П	К				
А03-400М-У2	$t_{p,m}^o$, с	Р	23	33	30,0	ПП	12,3 (11,1)	6,56 (5,93)	2,06 (1,86)
		Т	23	33	30,0	ДТ	29,2 (39,1)	1,19 (1,60)	0,356 (0,489)
	$\Delta W_{p,m}^o$, о.е.	Р	241,4	229,9	228,3	ТП	14,9 (17,1)	13,1 (15,1)	4,24 (4,87)
		Т	117,7	106,1	104,5	В	7,60 (9,11)	5,59 (6,70)	13,3 (15,9)
АОД-2000-6000-12У1	$t_{p,m}^o$, с	Р	11	15	13	ПП	5,81 (5,16)	3,12 (2,77)	7,27 (6,43)
		Т	11	15	13	ДТ	13,9 (19,9)	0,486 (0,698)	1,11 (1,61)
	$\Delta W_{p,m}^o$, о.е.	Р	67,04	64,29	63,60	ТП	7,60 (9,11)	5,59 (6,70)	13,3 (15,9)
		Т	29,60	26,85	26,16	В	7,60 (9,11)	5,59 (6,70)	13,3 (15,9)

Затем определялись электромагнитные потери энергии в тех же режимах применительно для КАД, работающего с вентиляторной нагрузкой, из соотношений [18]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{nn} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} - M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{nn.xx}, & \Delta W_{dm} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{dm.xx}, \\ \Delta W_{mm} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{mm.xx} \end{aligned} \right\}, \quad (38)$$

в которых средние значения M_{cp} электромагнитного момента двигателя находилось приближенно:

$$M_{cp,nn} \approx 0,5M_n(\lambda_n + \lambda_M), \quad M_{cp,dm} \approx -0,3M_n, \quad M_{cp,m} \approx -0,8M_n - \quad (39)$$

При прямом пуске, динамическом торможении и торможении противовключением соответственно, а среднее значение $M_{c.cp}$ статического момента нагрузки вычислялось приближенно с учетом (3) в виде:

$$M_{c.cp} \approx \frac{k}{t_{p,m}} \int_0^{t_{p,m}} M_{cn} \cdot \left(\frac{t}{t_{p,m}} \right)^2 \cdot dt = \frac{k}{3} M_{cn}, \quad (40)$$

где M_n – номинальное значение электромагнитного момента двигателя; λ_n и λ_M – паспортные значения пусковой и максимальной перегрузочных способностей двигателя по моменту; M_{cn} – номинальное значение статического момента вентиляторной нагрузки; k – коэффициент, равный единице при полностью открытом или 0,4 – при закрытом шибере [2].

Также в табл. 4 приведены (без скобок – с открытым, в скобках – с закрытым шибером) значения экономии $\Delta E_{p,m}$ электроэнергии, достигнутые за счет уменьшения ОЭПЭ в рассматриваемых двигателях при переходе от прямого пуска, динамического торможения и торможения противовключением – к частотным пуску и торможению, которые приходится на один пуск (или одно торможение) и рассчитывались соответственно в виде:

$$\Delta E_p = \Delta W_{nn} - \Delta W_p^o, \quad \Delta E_{m(dt)} = \Delta W_{dt} - \Delta W_m^o, \quad \Delta E_{m(tm)} = \Delta W_{tm} - \Delta W_m^o. \quad (41)$$

На рис. 6 построены (для оптимальных значений времен $t_{p,m}^o$ разгона и торможения электродвигателя А03-400М-У2, нагруженного на центробежный вентилятор ВМ-17) временные диаграммы электромеханических (скорости ω , модуля статорного тока I_s , статического момента M_c нагрузки, электромагнитного момента M) и энергетических (основных потерь электромагнитной мощности ΔP_{em}^* и энергии ΔW_p^* и ΔW_m^*) переходных процессов в ЧРАД, рассчитанных соответственно из зависимостей: (15), (23), (3), (27), (29) и (32) для указанного двигателя при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах.

На рис. 7 представлены графические зависимости для рассчитанных (применительно к электродвигателю А03-400М-У2, нагруженному на центробежный вентилятор ВМ-17) из соотношений (29) и (32), (33) – (36) величин: $(\Psi_r/\Psi_{rn})^2$, I_s/I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m , $\Delta P_{em}^*/\Delta P_{em}$ и $\Delta W_{p,m}^*/\Delta W_{p,m}$, – иллюстрирующих собой достигаемое повышение точности расчета ОЭПЭ ΔP_{em}^* и модуля I_s статорного тока с учетом уточненного расчета потерь в стали двигателя при пускотормозных режимах (для $t_{p,m} = 30$ с) с разными траекториями (линейной, параболической и квазиоптимальной) изменения скорости ЧРАД.

Представленные на рис. 7 графики свидетельствуют о превышении: при разгоне – модуля I_s статорного тока и потерь электромагнитной мощности ΔP_{em}^* над соответствующими значениями I_1 и ΔP_{em} этих параметров для идеализированного двигателя, а при торможении – наоборот, о превышении модуля

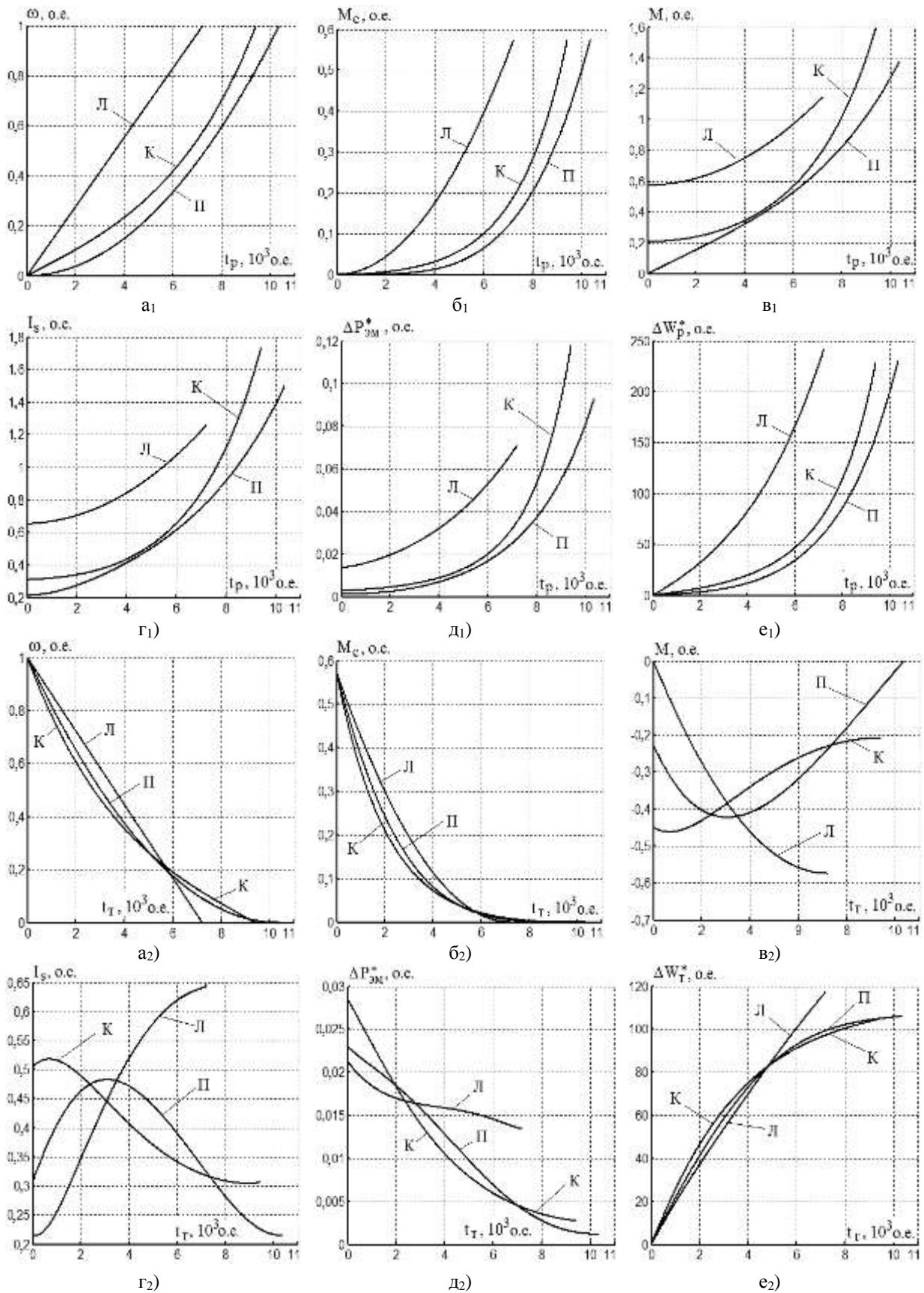


Рис. 6. Електроmechanical та енергетичні перехідні процеси при оптимальних временах $t_{p,m}^0$ розгона (а1 – е1) і торможения (а2 – е2) електродвигателя А03-400М-У2 з вентиляційною навантажкою для лінійної (Л), параболічної (П) і квазіоптимальної (К) траєкторій змінення швидкості

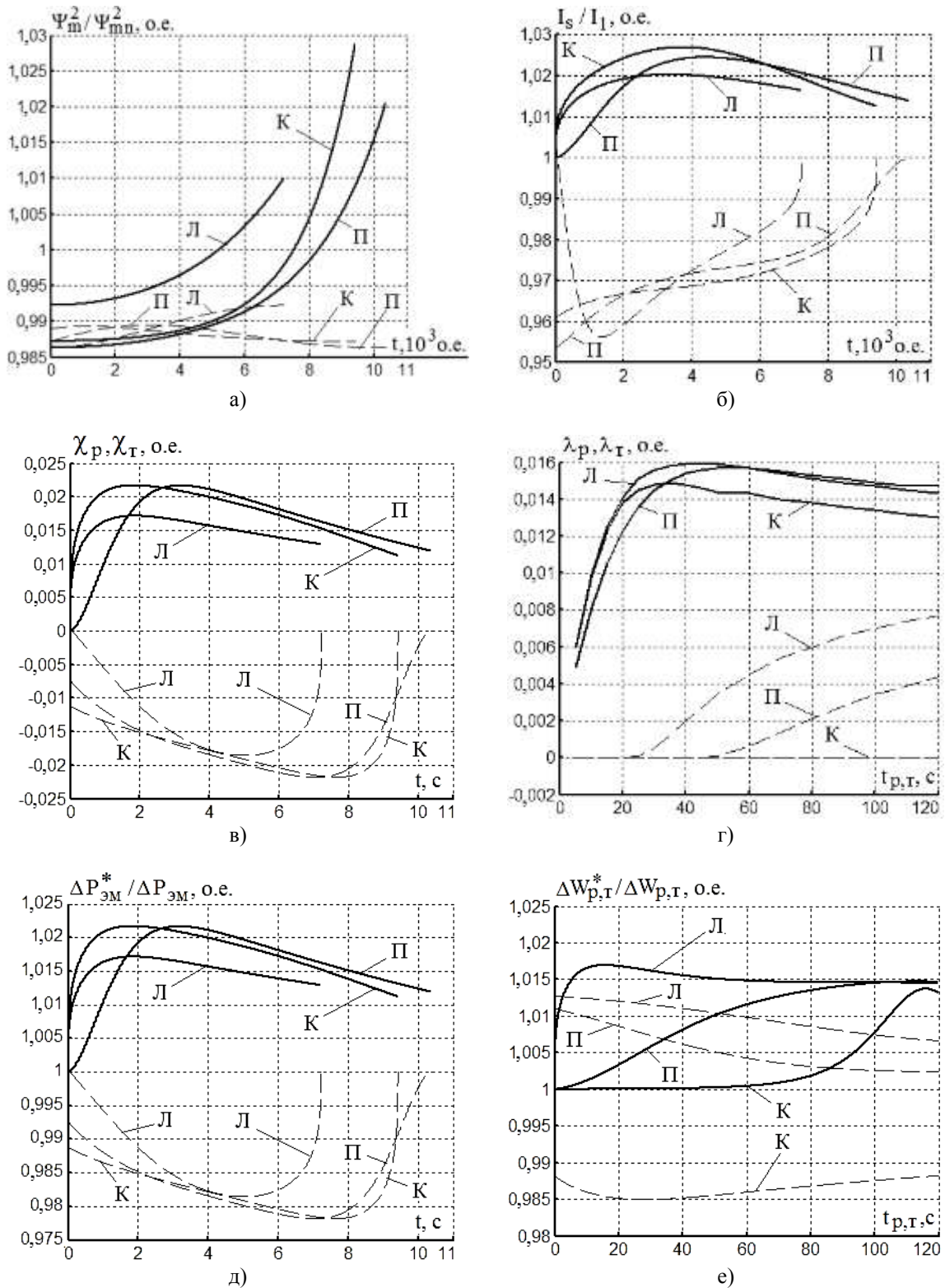


Рис.7 Рассчитанные для электродвигателя А03-400М-У2, нагруженного на вентиляторную нагрузку, графики величин: $(\Psi_r / \Psi_{rn})^2$, I_s / I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m (показанные: сплошной линией – при разгоне, пунктиром – при торможении).

I_1 статорного тока и потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} идеализированного ЧРАД над соответствующими значениями I_s и ΔP_{em}^* этих параметров неидеализированного двигателя. Это обусловлено тем, что энергия, затрачиваемая на потери в стали ЧРАД, передается неодинаковыми путями: при разгоне – с выхода преобразователя частоты через статорную обмотку к контуру намагничивания (показанному в виде элементов L_m и R_m на рис. 4), а при генераторном (рекуперативном) торможении – от вращающегося ротора к указанному контуру намагничивания.

Для перевода расчетных значений параметров режима ЧРАД из относительных единиц в абсолютные необходимо, как известно, умножить значение данной величины, полученное в относительных единицах, на соответствующее базисное значение для этой величины [4, 7]. Базисные значения для основных величин применительно к рассмотренным ЧРАД приведены в табл. 5.

Таблица 5

Базисные значения для основных расчетных величин ЧРАД

Тип электродвигателя	мощность	энергия	момент	статорный ток	скорость	время
	кВт	кДж	Нм	А	рад/с	с
АОЗ-400М-У2	368,22	1,1727	2345	456,8	155,5	0,01/π
АОД-2000-6000-12У1	2697	8,589	51530	367	52,09	0,01/π

ВЫВОДЫ

1. Предложенный вид квазиоптимальных траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах с вентиляторной нагрузкой (которые представляют временные функции (15) гиперболического синуса с варьируемым значением поправочного коэффициента ξ^*) обеспечивают хорошее совпадение (со среднеквадратичным отклонением менее 2,2%) с оптимальными траекториями скорости, соответствующими частным численным решениям уравнения (10) Эйлера. Согласно аналитическим (15) и графическим (на рис. 3) зависимостям для квазиоптимальных траекторий скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, для них установлена зеркальная (относительно вертикальной оси « ω ») симметрия.

2. Выявлено, что в исследованном широком диапазоне изменения времен разгона и торможения отличие значений ОЭПЭ при квазиоптимальной (К) и оптимальной (О) траекториях ЧРАД (при одинаковых значениях указанных времен) не превышает 0,5%. При любых одинаковых значениях времен разгона (или торможения) ЧРАД с вентиляторной нагрузкой для квазиоптимальной траектории скорости достигаются наименьшие значения ОЭПЭ в двигателе по сравнению с другими известными видами (линейным, параболическим) этих траекторий. В частности, согласно рис. 5 значения ОЭПЭ для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при квазиоптимальной траектории могут быть в пускотормозных режимах с временами, равными 120 с, меньше: в (2 – 3) раза – по сравнению с линейной или в (1,5 – 2) раза – по сравнению с параболической траекториями скорости (где большие значения соответствуют торможению).

3. Исходя из рис. 5, установлен для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий изменения скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой «U»-образный вид зависимостей ОЭПЭ от длительности времени разгона и торможения. С учетом этого для данных траекторий скорости существуют оптимальные значения времен разгона и торможения, при которых значения ОЭПЭ двигателя в пускотормозных режимах минимальны.

4. За счет перехода от прямого пуска к частотному пуску (с квазиоптимальной, параболической или линейной траекториями скорости при оптимальных временах разгона ЧРАД с вентиляторной нагрузкой) обеспечивается уменьшение электромагнитных потерь энергии двигателя при пуске в (27 – 49) раз при открытом или в (24 – 43) раза при закрытом шибере, что позволяет не только снизить затраты на оплату электроэнергии, но и уменьшить нагрев двигателя и увеличить допустимое его количество пусков в сутки. Одновременно при этом, как известно, при частотных пусках в несколько раз увеличиваются (за счет исключения отрицательных воздействий повышенных пусковых значений электромагнитного момента и статорных токов) межремонтные сроки эксплуатации электродвигателей.

5. Полученные и показанные на рис. 6 для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой временные диаграммы электромеханических и энергетических переходных процессов двигателя при разгоне и торможении свидетельствуют об их практической реализуемости (так как их текущие значения находятся в диапазоне допустимых для них рабочих значений).

6. Согласно графикам на рис. 7 предложенные зависимости (24), (26), (29) и (35) позволяют повысить точность расчета модуля I_s обобщенного вектора статорного тока и основных электромагнитных потерь мощности ΔP_{em}^* ЧРАД на 2,7% и 2,2%, а ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^*$ в пускотормозных режимах – на 1,7 %,

что достигается за счет учета потерь мощности в стали двигателя и дополнительных потерь мощности $\Delta P_{e,d}^*$, затрачиваемых на передачу указанных потерь в стали через статорную обмотку двигателя.

Список литературы

1. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелочков, М.Г. Ладычев. – М.: Теплотехник, 2005. – кн.1. – 688с.; кн.2 – 768с.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. Под ред. И.Я. Браславского. – М.: изд.центр. «Академия», 2004. – 256с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1966. – 298с.
4. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
5. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420с.
6. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
7. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
8. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.
9. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144с.
10. Волков А.В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А.В. Волков, А.А. Колесников // Электротехника. – 2013. – №5. – С.2–9.
11. Волков В.А. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – №2. – С.55 – 64.
12. Волков В.А. Исследование квазиоптимального управления скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя в пуско-тормозных режимах / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – №3. – С.23 – 37.
13. Радин В.И. Электрические машины: асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович: Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш.шк., 1988. – 328с.
14. Дымососы и вентиляторы: каталог-справочник. – М.:НИИ Информтяжмаш, 1974. – 184с.
15. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584с.
16. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
17. Кальницкий Л.А. Специальный курс высшей математики / Л.А. Кальницкий, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержеев. – М.: Высш.шк., 1978. – 389с.
18. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.Н. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1973. – 616с.
19. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/vm17-html/> (10.01.2018)
20. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/dymdod31-5-html/> (10.01.2018)

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, доц. Тиховодом С.М.

УДК 622.625.28

О.В. Єліна, канд. фіз.-мат. наук, М.М. Мілих, Є.М. Сніжко, канд.-ти техн. наук
(Україна, Дніпро, Дніпровський національний університет ім.Олесь Гончара)

Ю.Б.Починок

(Україна, Дніпро, ТОВ НВП „МонТекс”)

МОНІТОРИНГ БАТАРЕЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

Анотація. Розглянуто систему моніторингу батарей Li-Ion акумуляторів з використанням мереж MicroLan з інтерфейсом I-Wire, який об'єднує та дозволяє підключити до обладнання керування модулі вимірювання напруги, струму, температури та здійснювати пасивне балансування кожного окремого акумулятора батарей. Модулі захищені від високої напруги батареї гальванічною розв'язкою.

Ключові слова: Li-Ion акумулятор, система моніторингу, пасивна система балансування, вимірювання напруги, струму, температури батарей, гальванічна розв'язка, інтерфейс I-Wire.