

А. Д. Петрушин, А. И. Меликов

ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ

Аннотация. Электропривод с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором распространен достаточно широко благодаря эксплуатационной надежности и достаточно высоким энергетическим характеристикам. Авторами предложен способ дальнейшего улучшения энергетических характеристик асинхронного электродвигателя в динамических режимах при управлении амплитудой питающего напряжения. На базе математической модели обобщенной электрической машины в неподвижных осях α и β разработан алгоритм, позволяющий снизить электрические потери энергии в обмотках асинхронного электропривода в переходных режимах пуска и торможения. С использованием принципа максимума и метода Ньютона – Рафсона определена оптимальная функциональная зависимость амплитуды питающего напряжения асинхронного двигателя от времени переходного процесса. В качестве критерия оптимизации выбран минимум квадрата питающего электродвигатель напряжения. По результатам расчета получены графики изменения токов, электромагнитного момента угловой скорости вращения и электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя при оптимальных управляющих воздействиях.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, процессы пуска и торможения, параметрическое управление, оптимизация, принцип максимума, потери в обмотках электродвигателя, энергоэффективность.

Для цитирования: Петрушин, А. Д. Пуск и торможение асинхронных двигателей при параметрическом управлении / А. Д. Петрушин, А. И. Меликов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 174–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_174.

Введение

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором получили широкое распространение во всех сферах деятельности человека, где требуется преобразование электрической энергии в механическую. Современная тенденция использования АД заключается в том, что все большая их часть работает в составе регулируемого электропривода [1–2]. Существует достаточно много областей применения АД, где они часто работают в режимах пуска и торможения. Это различные виды металлообрабатывающего оборудования, роботизированное выполнение технологических операций в машиностроении, тяговые приводы транспортных средств и ряд других. Известно, что в этих динамических режимах пуска и торможения, перехода с одной скорости вращения на другую коэффициент полезного действия АД значительно меньше, чем в номинальном режиме. Тепло, выделяемое в обмотках и магнитопроводе, существенно ограничивает интенсивность использования электродвигателя. Повысить КПД в режимах пуска и торможения можно путем оптимального регулирования параметров питающего напряжения.

Среди способов регулирования скорости вращения АД наиболее эффективным является способ частотного управления, при котором изменяются как частота, так и амплитуда питающего напряжения [3–5]. Реже используется способ управления, при котором изменяется только амплитуда питающего напряжения при неизменной частоте. При этом изменяется параметр двигателя – скольжение. Такой способ управления относится к параметрическим. Параметрическое управление уступает частотному управлению в энергоэффективности и применяется в основном для плавного пуска в ход мощных АД либо для регулирования скорости вращения в узком диапазоне вблизи номинального значения. Практическая реализация параметрического способа управления АД несколько проще и дешевле, чем частотного управления. Параметрический способ управления АД может использоваться для организации режимов пуска и торможения в сочетании с алгоритмами оптимизации, что позволит получить высокие энергетические показатели.

Алгоритмы оптимизации, используемые в области электропривода, доказали свою эффективность при практической реализации [6–8]. Значительное распространение получил принцип максимума при оптимальном управлении электроприводами постоянного и переменного тока [8].

В данной статье предложен алгоритм оптимального параметрического управления пуском и торможением АД, при котором амплитуда питающего напряжения изменяется таким образом, чтобы обеспечить минимум функционала вида:

$$\Phi = \int_0^T \gamma^2 dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где γ – относительное напряжение питания (отношение текущего значения напряжения к базисному значению);

t – время;

T – период, в течение которого осуществляется переходный процесс.

Минимизация функционала (1) позволяет существенно сократить электрические потери в обмотках статора и ротора, которые в процессах пуска и торможения составляют большую часть всех выделяемых в электродвигателе потерь.

Основная часть

Для математического описания АД были использованы уравнения обобщенной электрической машины, записанные в следующем виде [7]:

$$\begin{bmatrix} i'_{s\alpha} \\ i'_{r\alpha} \\ i'_{s\beta} \\ i'_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cR_s & dR_r & \omega L_{sr} & \omega L_r \\ dR_s & -bR_r & -\omega bL_{sr} & -\omega bL_r \\ -\omega dL_{sr} & -\omega dL_r & -cR_s & dR_r \\ \omega bL_{sr} & \omega bL_r & dR_s & -bR_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix},$$

$$\omega' = \frac{pP_6}{\omega_6^3 J} [L_{sr}(i_{s\beta}i_{r\alpha} - i_{s\alpha}i_{r\beta}) - M_c]. \quad (2)$$

В уравнениях (2) использованы следующие обозначения

$$b = \frac{L_s}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad c = \frac{L_r}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad d = \frac{L_{sr}}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad P_6 = \frac{3}{2} u_6 i_6,$$

где $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ – проекции токов статора и ротора АД на неподвижные координатные оси α и β ; $\frac{di_{s\alpha}}{dt}, \frac{di_{r\alpha}}{dt}, \frac{di_{s\beta}}{dt}, \frac{di_{r\beta}}{dt}$ – производные по времени проекций токов статора и ротора по координатным осям α и β ; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения; L_s, L_r – индуктивности статора и ротора, L_{sr} – взаимная индуктивность между статором и ротором; M_s – электромагнитный момент; M_c – статический момент сопротивления на валу АД; J – момент инерции ротора АД.

Вычисления переменных производились в относительных единицах. Приняты следующие базисные значения:

$$\omega_6 = 2\pi f_n; \quad M_6 = P_6 / \omega_6; \quad L_6 = x_6 / \omega_6; \quad J_6 = M_6 / \omega_6; \quad t_6 = 1 / \omega_6,$$

где $\omega_6, i_6, u_6, M_6, P_6, L_6, x_6, t_6$ – базисные значения переменных: соответственно угловой скорости вращения, тока, напряжения, электромагнитного момента, мощности, индуктивности, индуктивного сопротивления, времени.

Проекция питающих напряжений на обмотках статора и ротора по координатным осям α и β вычислялись из выражений:

$$u_{s\alpha} = U_m \gamma \cos(\omega t); \quad u_{s\beta} = U_m \gamma \sin(\omega t). \quad (3)$$

Электромагнитный момент вычислялся по формуле:

$$M_s = M(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha}). \quad (4)$$

Электрические потери в переходном процессе за время от 0 до T были рассчитаны по выражению:

$$P_3 = \int_0^T i_{sa}^2 R_s dt + \int_0^T i_{sb}^2 R_s dt + \int_0^T i_{ra}^2 R_r dt + \int_0^T i_{rb}^2 R_r dt. \quad (5)$$

Преобразование проекций токов статора АД $i_{sa}, i_{ra}, i_{sb}, i_{rb}$ в координатных осях α и β в фазные токи i_a, i_b, i_c выполнено по следующим формулам [9]:

$$i_a = i_{sa}; \quad i_b = -\frac{1}{2}i_{sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}; \quad i_c = -\frac{1}{2}i_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}. \quad (6)$$

При математическом моделировании АД использованы допущения, которые соответствуют понятию «обобщенная электрическая машина» [9].

Математическая модель учитывает быстро протекающие электромагнитные переходные процессы в АД. Наличие уравнения движения в составе математической модели делает всю систему уравнений (2) жесткой, так как постоянные времени электромагнитных и электромеханических переходных процессов существенно отличаются. Жесткие математические модели требуют выбора шага интегрирования, который согласован с наименьшей постоянной времени.

Для решения задачи оптимизации был использован принцип максимума. Определена функция Гамильтона H :

$$H = \gamma^2 \Psi_0 + i'_{sa} \Psi_1 + i'_{ra} \Psi_2 + i'_{s\beta} \Psi_3 + i'_{r\beta} \Psi_4 + v \Psi_5. \quad (7)$$

Составлены вспомогательные функции $\Psi_0 - \Psi_5$:

$$\begin{bmatrix} \Psi'_1 \\ \Psi'_2 \\ \Psi'_3 \\ \Psi'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cR_s & -dR_s & \omega dL_{sr} & -\omega bL_{sr} \\ -dR_r & bR_r & \omega dL_r & -\omega bL_r \\ -\omega dL_{sr} & \omega bL_{sr} & cR_s & -dR_s \\ -\omega dL_r & \omega bL_r & -dR_r & bR_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \Psi_5 L_{sr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \\ i_{ra} \\ i_{sa} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\Psi'_5 = (\Psi_3 d - \Psi_4 b)(L_r i_{ra} + L_{sr} i_{sa}) - (\Psi_1 d - \Psi_2 b)(L_r i_{r\beta} + L_{sr} i_{s\beta}).$$

Согласно принципу максимума оптимальное управляющее воздействие – относительная амплитуда питающего напряжения γ^* – найдена из выражения $\frac{\partial H}{\partial \gamma} = 0$:

$$\gamma^* = \frac{U_m}{2} \left[(\Psi_1 - \Psi_2 d) \cdot \cos(\omega t) + (\Psi_3 c - \Psi_4 d) \cdot \sin(\omega t) \right]. \quad (9)$$

Начальные условия вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$ в дифференциальных уравнениях (8) заранее неизвестны. Для их определения использован метода Ньютона – Рафсона из условия получения в конце переходного процесса желаемой скорости вращения ротора АД [10]. Преимуществом метода Ньютона – Рафсона в сравнении с другими методами оптимизации является квадратичная сходимость вблизи искомого решения. Однако есть и недостаток – малая область сходимости (меньше, чем у градиентного метода). Влияние на процесс сходимости этого недостатка можно исключить, используя итерационный переход из исходной области сходимости, определяемой произвольными значениями $\Psi_1 - \Psi_5$ в область сходимости с заранее заданной скоростью вращения ротора в конце переходного процесса [8].

Выражения, определяемые методом Ньютона – Рафсона для определения начальных условий вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$, имеют следующий вид в матричной форме:

$$\Psi^{j+1}(0) = \Psi^j(0) - [K^j]^{-1} [y^{j+1}(T) - y^j(T)], \quad (8)$$

где $\psi^{j+1}(0)$ – начальные условия вспомогательных функций на последующей итерации; $\psi^j(0)$ – начальные условия вспомогательных функций на предыдущей итерации; $y^{j+1}(T)$ – значения токов и угловой скорости вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на последующей итерации; $y^j(T)$ – значения токов и угловой скорости вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на предыдущей итерации.

Расчеты были выполнены для электродвигателя АИР80В4У3 мощностью 1,5 кВт со следующими параметрами схемы замещения в относительных единицах:

$$R_s = 0,12; \quad R_r = 0,06; \quad L_{sr} = 1,9; \quad L_s = 1,978; \quad L_r = 2,02. \quad (9)$$

Вначале были выполнены расчеты пуска АД до номинальной скорости вращения при прямом подключении к источнику питающего напряжения 380 В с частотой 50 Гц. Результаты расчетов без нагрузки на валу приведены на рис. 1. На рис. 2 приведены результаты расчетов при нагрузке равной 30 % от номинального значения. Аналогичные расчеты без нагрузки на валу и с нагрузкой 30 % были выполнены по оптимизационному алгоритму за то же время, что и при прямом подключении АД. Результаты приведены соответственно на рис. 3 (левая часть) и рис. 4. Также были выполнены расчеты тормозного режима АД при оптимальном параметрическом управлении, результаты расчета которого представлены в правой части рис. 3.

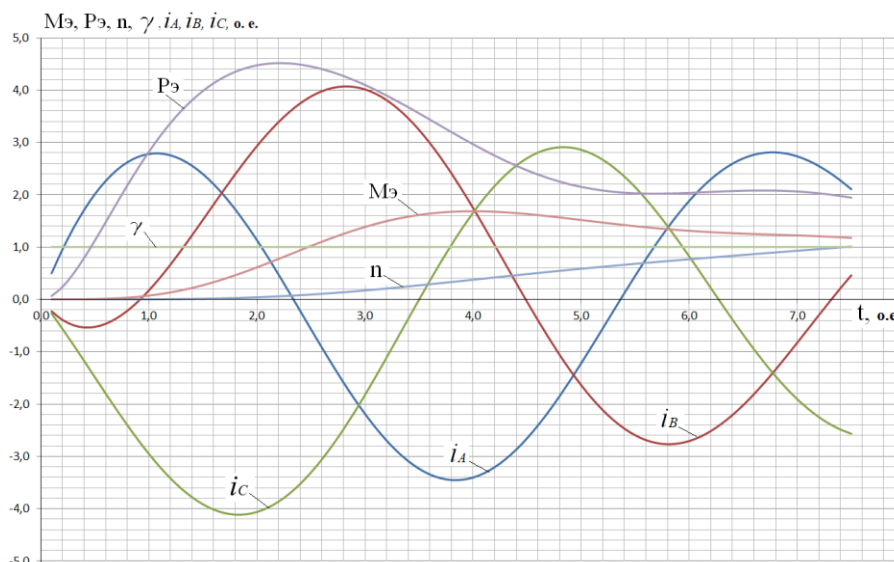


Рис. 1. Прямой пуск АД без нагрузки

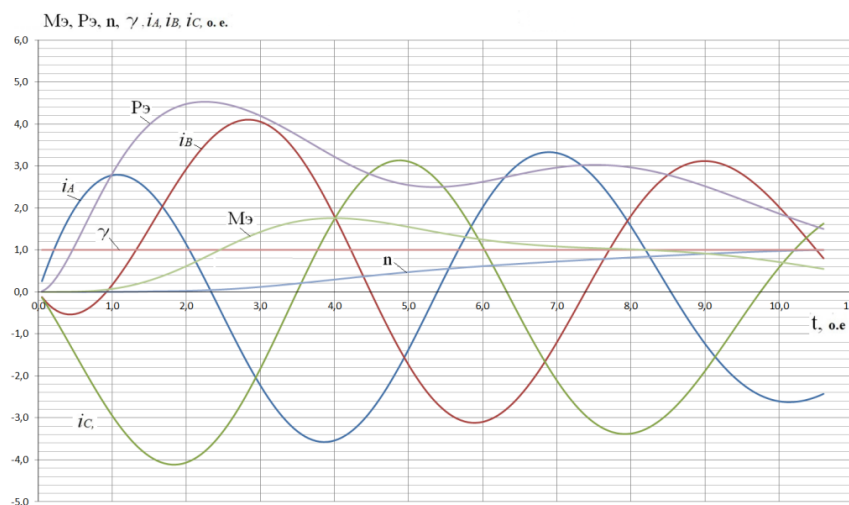


Рис. 2. Прямой пуск АД за время 10,6 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

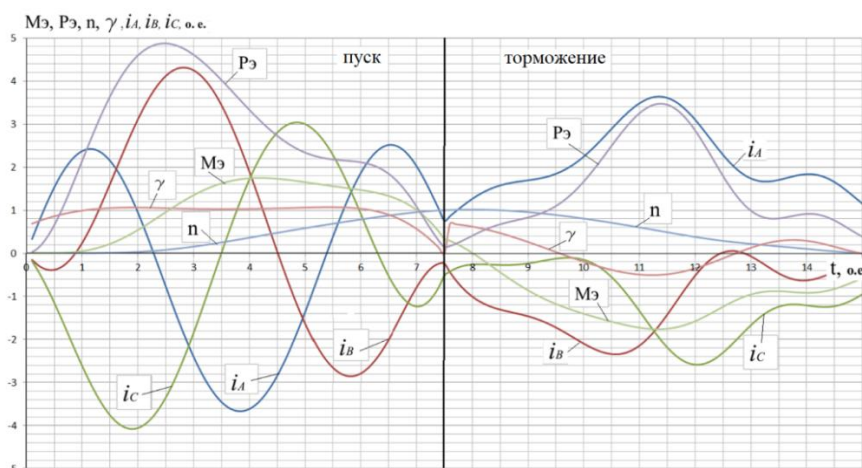


Рис. 3. Оптимальный пуск и оптимальное торможение АД без нагрузки на валу

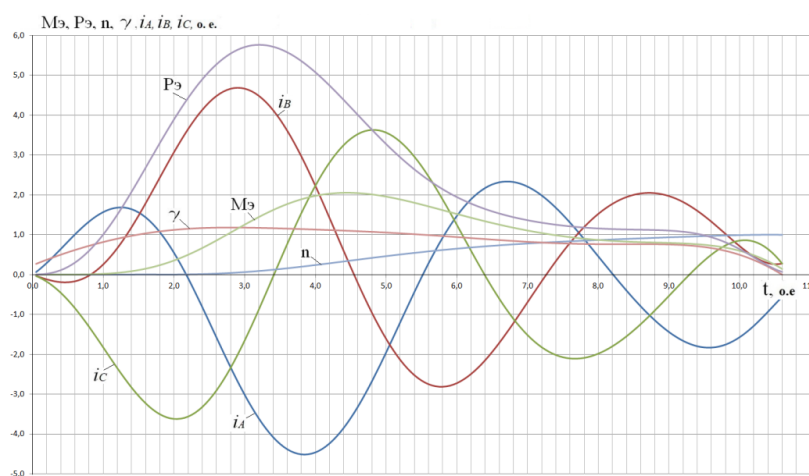


Рис. 4. Оптимальный пуск АД за время 10,6 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

На рис. 5 приведены результаты расчетов при нагрузке равной 30 % от номинального значения при меньшем времени разгона, чем при прямом включении АД на номинальное напряжение. Сокращение времени пуска приводит к росту максимальных значений токов статора, но электрические потери за время пуска остаются достаточно низкими за счет сокращения времени пуска.

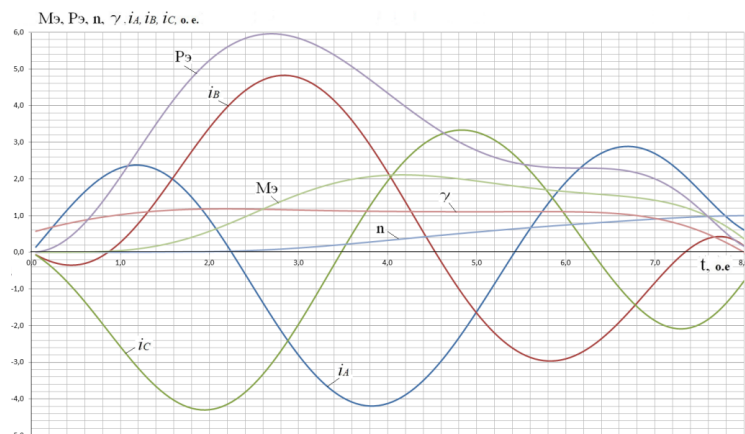


Рис. 5. Оптимальный пуск АД за время 8 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

В таблице приведены сравнительные данные по электрическим потерям в статоре и роторе для прямого включения АД на номинальное напряжение и при оптимальном параметрическом управлении. Электрические потери в обмотках АД были рассчитаны по уравнению (5).

**Сравнение параметров оптимального параметрического управления
АД с прямым включением на номинальное напряжение**

| № п/п | Тип переходного процесса | Электрические потери в статоре и роторе, о.е. (%) | Время переходного процесса, о.е. |
|-------|-----------------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Прямой пуск без нагрузки | 20,7 (принят 100 %) | 7,5 |
| 2 | Оптимальный пуск без нагрузки | 20,2 (97,6 %) | 7,5 |
| 3 | Прямой пуск с нагрузкой 30 % | 30,4 (принят 100 %) | 10,6 |
| 4 | Оптимальный пуск с нагрузкой 30 % | 25,1 (82,6 %) | 10,6 |
| 5 | Оптимальный пуск с нагрузкой 30 % | 24,8 (81,6 %) | 8 |
| 6 | Оптимальный пуск с нагрузкой 50 % | 31,8 (104,6 %) | 12 |
| 7 | Оптимальное торможение | 11,2 | 7,5 |

Сравнительные данные по электрическим потерям при пуске АД на холостом ходу (без нагрузки) отличаются незначительно – в пределах 2–3 процентов. При пуске АД с нагрузкой на валу положительный эффект от параметрического управления более существенный. Так, при нагрузке равной 30 % от номинального значения оптимальное параметрическое управление позволяет снизить электрические потери в обмотках АД на 17,4 % за то же время переходного процесса пуска.

Известно, что при прямом включении в сеть переменного тока в первый период питающего напряжения в электромагнитный контур АД поступает энергии значительно больше, чем за этот период возрастет механическая энергия в результате электромеханического преобразования [9]. По этой причине возникает колебательный процесс обмена энергией между источником питания и электромагнитным контуром АД. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию электрических потерь в обмотках АД. Отличительной особенностью оптимального параметрического управления является плавное нарастание амплитуды питающего напряжения в начальный период пускового режима до номинального значения. Это позволяет оптимально дозировать поступление энергии из источника в электромагнитный контур активной части АД с последующим электромеханическим преобразованием энергии.

Возможности оптимального параметрического управления можно использовать и для организации процесса торможения за заданное время (см. рис. 3 (правая часть)). Если время оптимального параметрического торможения выбрать такое же, как и время пуска на холостом ходу, то электрические потери в обмотках АД составят примерно половину от электрических потерь в пусковом режиме.

Выводы

Электропривод с асинхронными электродвигателями использует для своей работы значительное количество электроэнергии. Повышение энергоэффективности электромеханического преобразования энергии можно существенно увеличить, используя алгоритмы оптимального управления, построенные на математической модели асинхронного электродвигателя, которая учитывает быстро протекающие электромагнитные переходные процессы. В периоды пуска и торможения, которые отличаются низким КПД, предложенный алгоритм оптимального параметрического управления позволяет снизить электрические потери в статоре и роторе АД, работающего в составе различных машин и механизмов.

Предложенный алгоритм оптимального параметрического управления может быть использован для повышения энергоэффективности работы асинхронного электропривода и актуален для асинхронных электроприводов, которые работают в частых режимах пуска и торможения.

Список литературы

1 **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2004. – 574, [1] с. – ISBN 5-7695-1314-4 : 5100 экз.

References

1 **Belov, M. P.** Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes : textbook for universities / M. P. Belov, V. A. Novikov, L. N. Rassudov. – 2-e ed., stereotypical. – Moscow : Academy, 2004. – 574, [1] p. – ISBN 5-7695-1314-4 : 5100 copies.

2 Сравнительный анализ характеристик асинхронного и синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением в приводе грузового транспортного средства повышенной проходимости на основе математического моделирования / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, В. М. Казакбаев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 3 (55). – С. 102–119. – DOI 10.25699/SSSB.2024.55.3.014.

3 **Макаров, В. Г.** Модель асинхронного электропривода с частотным регулированием скорости при поддержании постоянства потокосцепления статора в Matlab / В. Г. Макаров, А. Т. Аббазов, Д. А. Каримов // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 167–173. – EDN URAEXM.

4 **Евсиков, А. А.** Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А. А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с. – ISBN 978-5-89847-592-5.

5 **Хатламаджиян, А. Е.** Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Яицков, И. А. Степин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 107–110. – ISSN 1818-5509.

6 **Макаров, В. Г.** Асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы : монография / В. Г. Макаров. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2010. – 300 с. – ISBN 978-5-7882-0998-2.

7 **Самосейко, В. Ф.** Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

8 Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми электродвигателями электропоезда / А. Д. Петрушин, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. С. Мазнев // Электротехника. – 2021. – № 10. – С. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Копылов, И. П.** Математическое моделирование асинхронных машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Ф. Я. Беспалов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. – ISBN 5-06-003861-0.

10 Использование метода Ньютона – Рафсона при многокомпонентном математическом моделировании разработки месторождений жидких и газообразных углеводородов / И. В. Афанаскин,

2 Comparative analysis of the characteristics of an asynchronous and synchronous motor with electromagnetic excitation in the drive of an all-terrain cargo vehicle based on mathematical modeling / V. A. Prakht, V. A. Dmitrievsky, V. M. Kazakbaev [et al.] // South-Siberian Scientific Bulletin. – 2024. – No. 3 (55). – P. 102–119. – DOI 10.25699/SSSB.2024.55.3.014.

3 **Makarov, V. G.** Model of an asynchronous electric drive with frequency speed control while maintaining a constant stator flux linkage in Matlab / V. G. Makarov, A. T. Abbazov, D. A. Karimov // Herald of the Technological University. – 2018. – Vol. 21, No. 4. – P. 167–173. – EDN URAEXM.

4 **Evsikov, A. A.** Automated electric drive with frequency control : textbook / A. A. Evsikov, V. A. Kokovin, A. P. Leonov. – Dubna : Dubna State University, 2020. – 121 p. – ISBN 978-5-89847-592-5.

5 **Khatlamadzhiyan, A. E.** The use of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the transportation process of rolling stock / A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Yaitskov, I. A. Stepin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 107–110. – ISSN 1818-5509.

6 **Makarov, V. G.** Asynchronous electric drive with optimal operating modes : monograph / V. G. Makarov. – Kazan : Kazan National Research Technological University, 2010. – 300 p. – ISBN 978-5-7882-0998-2.

7 **Samoseiko, V. F.** Optimal control of an asynchronous motor by the criterion of energy losses / V. F. Samoseiko, V. O. Guskov // Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

8 Optimal frequency control of asynchronous traction electric motors of an electric train / A. D. Petrushin, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. S. Maznev // Electrical Engineering. – 2021. – No. 10. – P. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Kopylov, I. P.** Mathematical modeling of asynchronous machines : a textbook for universities / I. P. Kopylov, F. A. Mamedov, F. Ya. Bespalov. – 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow : Vysshaya shkola, 2001. – 327 p. – ISBN 5-06-003861-0.

10 The use of the Newton-Raphson method in multicomponent mathematical modeling of the development of liquid and gaseous hydrocarbon deposits / I. V. Afanaskin, S. G. Volpin,

С. Г. Вольпин, А. В. Королев, П. В. Ялов // Вестник кибернетики. – 2018. – № 2 (30). – С. 32–42. – eISSN 1999-7604.

A. V. Korolev, P. V. Yalov // Proceedings in Cybernetics. – 2018. – No. 2 (30). – P. 32–42. – eISSN 1999-7604.

A. D. Petrushin, A. I. Melikov

STARTING AND BRAKING OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH PARAMETRIC CONTROL

Abstract. An electric drive with asynchronous electric motors with a short-circuited rotor is widespread enough due to operational reliability and sufficiently high energy characteristics. The authors propose a method for further improving the energy characteristics of an asynchronous electric motor in dynamic modes with control of the amplitude of the supply voltage. Based on a mathematical model of a generalized electric machine in fixed axes α and β , an algorithm has been developed to reduce electrical energy losses in the windings of an asynchronous electric drive in transient start and braking modes. Using the maximum principle and the Newton-Raphson method, the optimal functional dependence of the amplitude of the supply voltage of an asynchronous motor on the time of the transient process has been determined. The minimum square of the voltage supplying the electric motor is selected as an optimization criterion. Based on the calculation results, graphs of changes in currents, the electromagnetic moment of the angular velocity of rotation and electrical losses in the windings of the asynchronous motor with optimal control actions are obtained.

Keywords: asynchronous motor, starting and braking processes, parametric control, optimization, maximum principle, losses in the windings of the electric motor, energy efficiency.

For citation: Petrushin, A. D. Starting and braking of asynchronous motors with parametric control / A. D. Petrushin, A. I. Melikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 174–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_174.

Сведения об авторах

Петрушин Александр Дмитриевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: alex331685@yandex.ru

Меликов Алимурад Иламинович
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru

Information about the authors

Petrushin Alexandr Dmitrievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Cars and Car Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: alex331685@yandex.ru

Melikov Alimurad Paminovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Cars and Car Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru