

*А. Д. Петрушин, В. В. Ляхов, А. И. Меликов*

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию режимов оптимального торможения асинхронным электроприводом с использованием принципа максимума. Критерием оптимизации выбран минимум квадрата питающего электродвигатель напряжения. Управляющими воздействиями являлись частота и амплитуда питающего напряжения. При расчетах использовалась математическая модель обобщенной электрической машины. Определено, что для случаев, когда требуется сокращение времени торможения асинхронного электропривода в соответствии с условиями работы электрооборудования, необходимо учитывать, что сокращение времени торможения приведет к увеличению электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя и росту амплитудных значений тока и электромагнитного момента. Увеличение времени торможения позволит уменьшить электрические потери. Зависимость электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя от времени оптимального торможения не линейна, следовательно, время торможения целесообразно выбирать на пологом участке этой зависимости.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, оптимизация, процесс торможения, потери в обмотках электродвигателя, электрическая энергия, энергоэффективность, принцип максимума, технологическое оборудование.

**Для цитирования:** Петрушин, А. Д. Оптимальные тормозные режимы работы асинхронного электропривода / А. Д. Петрушин, В. В. Ляхов, А. И. Меликов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 103–110. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_3\_103.

### *Введение*

Выбор типа электродвигателя для автоматизации технологических процессов представляет важную задачу, направленную на достижение высокого уровня производительности технологического оборудования. Системы электропривода с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АД) стали популярным выбором в различных промышленных сферах применения благодаря ряду их положительных качеств, в том числе и совместимости с системами автоматизации. Основными достоинствами АД являются их высокая энергоэффективность и надежность. В конструкции АД не используются дорогие постоянные магниты и нет каких-либо скользящих контактов как у синхронных машин или машин постоянного тока [1–2].

К настоящему времени накоплен большой опыт интеграции асинхронного электропривода (АЭП) в системы автоматизации технологических процессов. АЭП могут взаимодействовать с другими системами автоматизации по широко используемым протоколам связи. Такая совместимость позволяет эффективно управлять всем процессом производства [3–4].

Существует достаточно много промышленных предприятий, в производственных процессах которых автоматическое регулирование технологического параметра предполагает частое включение, отключение или переход электродвигателя с одной частоты вращения на другую. Это роботизированное изготовление узлов и деталей в машиностроении, автоматическое регулирование давления насосных агрегатов, автоматизация стана горячей прокатки металла и ряд других операций.

Повышение производительности труда и объема выпускаемой продукции может быть обеспечено за счет увеличения скорости протекания процессов. Часто процессы торможения электродвигателей относятся к непроизводительной части технологического цикла и снижают производительность оборудования. Остановить вращение АД за короткое время можно только учитывая некоторые ограничения. Основное ограничение связано с интенсивным выделением электрических потерь при торможении, которые нагревают проводники обмотки, что может привести к быстрому старению изоляции и ее повреждению. Также имеются ограничения по механической прочности узлов трансмиссии, обеспечивающей передачу механической энергии с вала АД к рабочему механизму. При быстром торможении АД следует принимать во внимание и энергоэффективность процесса торможения, то есть необходимость организовать процесс таким образом, чтобы энергия, накопленная во вращающемся роторе, в большей своей части вернулась в

источник питания. При использовании алгоритмов оптимизации в процессе управления АЭП можно обеспечить максимальную энергоэффективность процесса торможения АД.

Использование алгоритмов оптимизации в АЭП также имеет ряд ограничений. Поскольку управлять АЭП необходимо в режиме реального времени, то алгоритм не должен быть слишком сложным, чтобы дать возможность микропроцессорной системе успеть его реализовать за время торможения. С другой стороны, при сокращении времени торможения ощутимым становится влияние быстро протекающих электромагнитных переходных процессов, а их учет требует значительного увеличения количества решаемых дифференциальных уравнений и, соответственно, сложность реализации алгоритма многократно возрастает [5–7].

### Основная часть

К настоящему времени качество работы силовых полупроводниковых приборов и промышленных микропроцессоров выросло настолько, что стало возможным на их основе реализовать достаточно сложные алгоритмы управления АЭП с учетом электромагнитных переходных процессов [8]. В данной статье предложен алгоритм реализации оптимальных тормозных режимов АЭП, который представляет из себя двухточечную задачу оптимального управления при минимизации функционала  $\Phi$ .

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

где  $\gamma$  – относительное напряжение питания;  $t$  – текущее значение времени,  $T$  – период времени, в течение которого происходит торможение АЭП.

Такой алгоритм, как показали расчеты, позволяет существенно сократить электрические потери в АД. Для решения поставленной задачи оптимизации был использован принцип максимума Л.С. Понтрягина на базе математической модели обобщенной электрической машины [9]. Математическая модель описывает электромеханические и электромагнитные переходные процессы в АД и является жесткой, так как постоянные времени электромеханическая и электромагнитная отличаются более чем на порядок. При жестких математических моделях выбирают специальные алгоритмы решения дифференциальных уравнений с автоматическим выбором шага интегрирования, что в свою очередь требует значительных вычислительных ресурсов и быстродействия от технических средств реализации алгоритма.

Математическая модель обобщенной электрической машины представляет собой четыре дифференциальных уравнения для проекций токов статора и ротора на неподвижные относительно статора координатные оси  $\alpha$ ,  $\beta$  и одно уравнения движения [9]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{L_r(u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) + M(u_{r\alpha} + R_r i_{r\alpha}) + Mp\omega(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{r\alpha}}{dt} &= \frac{-L_s(u_{r\alpha} + R_r i_{r\alpha}) + M(R_s i_{s\alpha} - u_{s\alpha}) - L_s p\omega(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{L_r(u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) + M(u_{r\beta} + R_r i_{r\beta}) - Mp\omega(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} &= \frac{-L_s(u_{r\beta} + R_r i_{r\beta}) + M(R_s i_{s\beta} - u_{s\beta}) + L_s p\omega(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{pM(i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c}{J}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$  – проекции токов статора и ротора на координатные оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  – проекции питающих напряжений на обмотках статора и ротора на координатные оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $L_s, L_r, M$  – индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность между статором и ротором;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $\omega$  – угловая частота вращения;  $p$  – число пар полюсов АД;  $M_c$  – статический момент сопротивления на валу асинхронного двигателя.

Для удобства анализа и представлений результатов вычислений расчеты выполнялись в относительных единицах. Была принята следующая система базисных величин.  $I_G = I_n \sqrt{2}$  – базисный ток.

$U_6 = U_n \sqrt{2}$  – базисное напряжение.  $Z_6 = U_n / I_n$  – базисное сопротивление.  $P_6 = 1,5 U_6 I_6$  – базисная мощность.  $\omega_6 = 2 \pi f_n$  – базисная угловая частота вращения.  $t_6 = 1 / \omega_6$  – базисное время.

Электромагнитный момент вычислялся из выражения

$$M_3 = M(i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (3)$$

Согласно алгоритму принципа максимума определена функция Гамильтона  $H$

$$H = \gamma^2 \Psi_0 + i'_{s\alpha} \Psi_1 + i'_{r\alpha} \Psi_2 + i'_{s\beta} \Psi_3 + i'_{r\beta} \Psi_4 + v' \Psi_5. \quad (4)$$

В качестве управляющих воздействий приняты относительная частота  $\alpha$  и относительная амплитуда питающего напряжения  $\gamma$ . Их оптимальные значения  $\alpha^*$  и  $\gamma^*$  определялись из следующих выражений:

$$\frac{\partial H}{\partial f} = 0, \text{ откуда получаем } f^* = \frac{1}{t} \arctg \frac{\Psi_3 c - \Psi_4 d}{\Psi_1 c - \Psi_2 d}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \gamma} = 0, \text{ откуда получаем } \gamma^* = \frac{U_n}{2} [(\Psi_1 - \Psi_2 d) \cos(ft) + (\Psi_3 c - \Psi_4 d) \sin(ft)]. \quad (6)$$

Производные вспомогательных функций  $\Psi_1 - \Psi_5$  в уравнении (4) определялись из выражений

$$\begin{aligned} \Psi'_1 &= \Psi_1 c R_s - \Psi_2 d R_s + \Psi_3 \omega d M - \Psi_4 \omega b M + \alpha \Psi_5 M i_{r\beta}; \\ \Psi'_2 &= -\Psi_1 d R_r + \Psi_2 b R_r + \Psi_3 \omega d L_r - \Psi_4 \omega b L_r - \alpha \Psi_5 M i_{s\beta}; \\ \Psi'_3 &= -\Psi_1 \omega d M + \Psi_2 \omega b M + \Psi_3 c R_s - \Psi_4 d R_s - \alpha \Psi_5 M i_{r\alpha}; \\ \Psi'_4 &= -\Psi_1 \omega d L_r + \Psi_2 \omega b L_r - \Psi_3 d R_r + \Psi_4 b R_r + \alpha \Psi_5 M i_{s\alpha}; \\ \Psi'_5 &= (\Psi_3 d - \Psi_4 b)(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha}) - (\Psi_1 d - \Psi_2 b)(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}), \end{aligned} \quad (7)$$

где в уравнениях (5), (6) и (7) введены следующие обозначения:

$$a = \frac{p}{J}; \quad b = \frac{L_s}{L_s L_r - M^2}; \quad c = \frac{L_r}{L_s L_r - M^2}; \quad d = \frac{M}{L_s L_r - M^2}.$$

В уравнениях (7) требуется определить начальные значения вспомогательных функций  $\Psi_1 - \Psi_5$  из условия, чтобы в конце переходного процесса торможения была получена нулевая частота вращения ротора АД. Для определения начальных значений вспомогательных функций был использован метод Ньютона – Рафсона [10].

Согласно методу Ньютона – Рафсона выражения для определения начальных условий вспомогательных функций  $\Psi_1 - \Psi_5$  имеют следующий вид:

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

где  $\Psi^{j+1}(0)$  – вектор-столбец начальных условий вспомогательных функций на последующей итерации;  $\Psi^j(0)$  – вектор-столбец начальных условий вспомогательных функций на предыдущей итерации;  $y^{j+1}(T)$  – вектор-столбец значений токов и частоты вращения  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$  в конце переходного процесса на последующей итерации;  $y^j(T)$  – вектор-столбец значений токов и частоты вращения  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$  в конце переходного процесса на предыдущей итерации. В начале реализации метода Ньютона – Рафсона в дифференциальных уравнениях (7) начальные условия вспомогательных функций выбраны произвольными.

Для проведения расчетов оптимального торможения АД требуются начальные значения токов статора и ротора, которые были получены после расчета режима пуска для АД со следующими параметрами:

$$R_s = 0,067; \quad R_r = 0,06; \quad M = 2,35; \quad L_s = 2,42; \quad L_r = 2,47. \quad (9)$$

После окончания расчета режима пуска, значения токов статора и ротора были следующие:

$$i_a = -1,366; \quad i_b = 0,361; \quad i_c = 1,005. \quad (10)$$

Фазные токи  $i_a, i_b, i_c$  получены из проекций токов  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$  по следующим формулам [9]:

$$i_a = i_{s\alpha}; \quad i_b = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}; \quad i_c = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}. \quad (11)$$

Электрические потери в статоре и роторе за период торможения были рассчитаны по уравнению

$$\Delta P_{\text{э}} = \int_0^T i_{s\alpha}^2 R_s dt + \int_0^T i_{s\beta}^2 R_s dt + \int_0^T i_{r\alpha}^2 R_r dt + \int_0^T i_{r\beta}^2 R_r dt. \quad (12)$$

В зависимости от желаемого времени торможения меняются амплитудные значения токов и потери, выделяемые в обмотках статора и ротора. Для определения зависимости электрических потерь в статоре и роторе от времени оптимального торможения был выполнен ряд расчетов оптимального торможения, начиная от  $T = 2$  о.е. до  $T = 12$  о.е., результаты приведены на рис. 1.

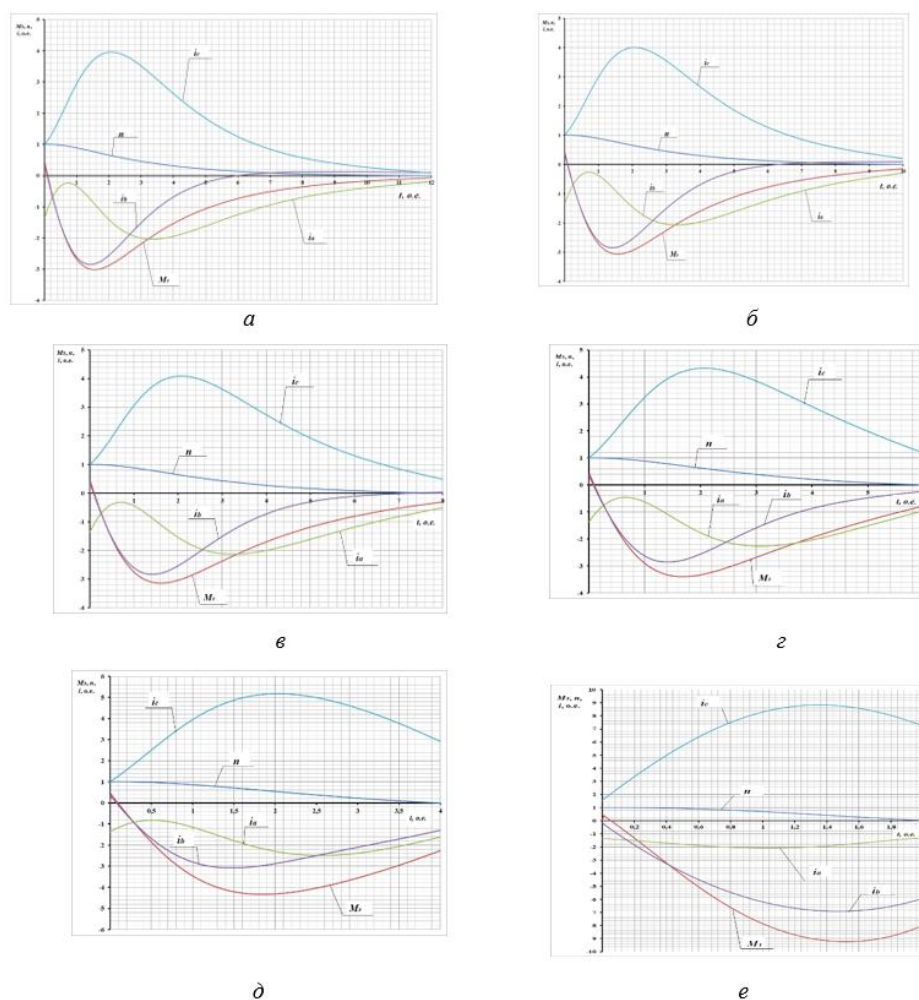


Рис. 1. Оптимальное торможение АД при разной интенсивности

Как видно из графиков *a–e*, сокращение времени оптимального торможения приводит к постепенному приближению параметров АД к ограничениям. На графике *a* при времени торможения 12 о.е. амплитуда тока фазы *C* (наибольшая из токов фаз АД) не превышает значения 4 о.е. (четырёх значений номинального тока), а электромагнитный момент не превышает 3 о.е. На графике *д* при времени торможения 4 о.е. амплитуда тока фазы *C* возрастает до 5,2 о.е., электромагнитный момент до 4,4 о.е., что в большинстве случаев работы технологического оборудования является нежелательным. Дальнейшее

сокращение времени оптимального торможения приводит к недопустимым амплитудным значениям тока и электромагнитного момента, что видно из графика *e*.

На рис. 2 приведен график зависимости электрических потерь в обмотках АД от времени оптимального торможения. Начиная от времени торможения 4 о.е. и далее до 12 о.е. потери изменяются незначительно. При необходимости сокращения времени торможения целесообразно выбирать значения близкие к 4 о.е., так как при меньшем времени существенно возрастают амплитудные значения токов и электромагнитного момента.

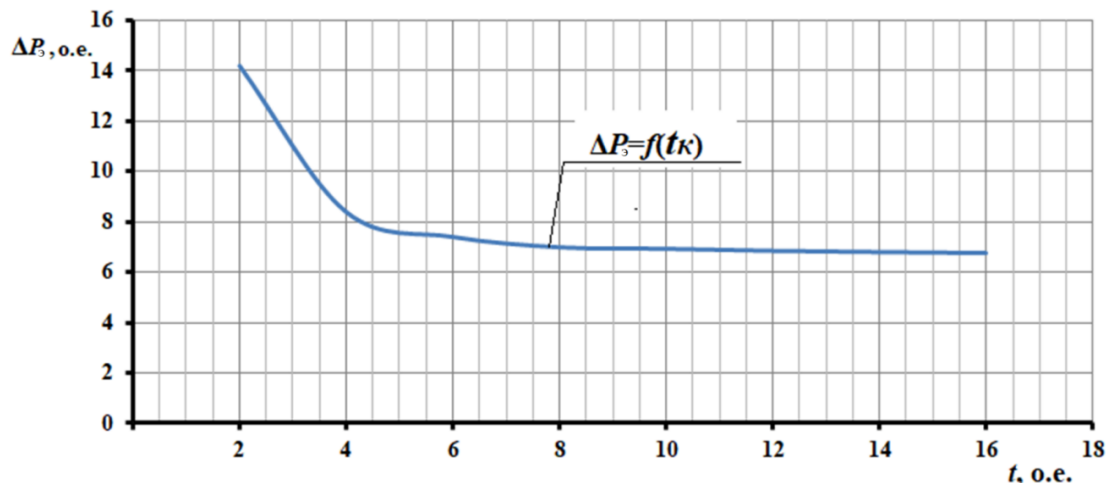


Рис. 2. Электрические потери в обмотках статора и ротора АД

В таблице приведены данные в относительных единицах по расчету электрических потерь в обмотках статора и ротора АД при оптимальном торможении. Электрические потери были рассчитаны по уравнению (12). Также в таблице приведены значения амплитуды тока фазы С ( $A_c$ ), так как амплитуда тока в этой фазе наибольшая по сравнению с фазами А и В.

#### Параметры оптимального торможения

	Амплитуда тока фазы С, $A_c$ , о.е.	Электрические потери в статоре, $\Delta P_{\text{с}}$ , о.е.	Электрические потери в роторе, $\Delta P_{\text{р}}$ , о.е.	Суммарные электрические потери, $\Delta P_3$ , о.е.	Время торможения, $t$ , о.е.
1	8,84	7,97	6,23	14,2	2
2	5,17	4,66	3,75	8,41	4
3	4,33	4,05	3,37	7,42	6
4	4,09	3,85	3,25	7,1	8
5	4,01	3,76	3,19	6,95	10
6	3,96	3,8	3,17	6,87	12

Как следует из данных таблицы, сокращение времени оптимального торможения с 12 о.е. до 4 о.е. приводит к увеличению электрических потерь АД примерно на 18 %. Несмотря на сокращение времени выделения потерь в обмотках АД в 3 раза (с 12 о.е. до 4 о.е.), электрические потери нарастают столь интенсивно, что результирующие электрические потери за время торможения 4 о.е. оказываются больше, чем за период торможения 12 о.е. В этом случае возникает опасность перегрева слоев изоляции непосредственно прилегающих к медным проводам статорной обмотки АД, так как отвод тепла представляет собой достаточно инерционный процесс и выделившаяся энергия в медных проводниках нагревает их быстрее, чем тепло отводится через слои изоляции и конструктивные элементы АД в окружающую среду.

В АД к основным потерям относят помимо электрических потерь и потери в стали, вызванные гистерезисом и вихревыми токами. Часто потери в стали рассчитывают по приближенным эмпирическим соотношениям, считая, что они пропорциональны частоте вращения в степени от 1,3 до 1,5. При корректно спроектированном АД в номинальном режиме электрические потери и магнитные потери

близки к друг другу. Но в переходных режимах это соотношение резко меняется в сторону электрических потерь из-за роста тока выше номинального. Из графиков  $a-e$ , изображенных на рис. 1, видно, что токи АД существенно выше номинальных, достигая в амплитудных величинах близко к четырехкратному значению. Учитывая, что электрические потери пропорциональны квадрату тока (12), в переходном процессе торможения эти потери значительно превосходят потери в стали. На нагрев слоев изоляции, примыкающих к медным проводникам, электрические потери имеют решающее значение. При выполнении более точных расчетов теплового состояния АД с учетом потерь в стали можно воспользоваться известными соотношениями. Особенности приведенного в данной статье алгоритма управления АД учитываются в этих соотношениях по частотным характеристикам.

### Выводы

Задача оптимального торможения АЭП, решаемая с помощью уравнений (2)–(7) является двухточечной, то есть имеет две известные точки – время начала и окончания переходного процесса. В случаях, когда требуется сокращение времени торможения в соответствии с условиями работы электрооборудования, необходимо учитывать, что сокращение времени торможения приведет к увеличению электрических потерь в обмотках АД до максимального быстродействия, при котором наступают ограничения по амплитудным значениям тока и электромагнитного момента. Увеличение времени торможения приведет к уменьшению электрических потерь. Зависимость электрических потерь в обмотках АД от времени оптимального торможения не линейна (рис. 2), следовательно, время торможения целесообразно выбирать на пологом участке этой зависимости.

Предложенный алгоритм оптимального управления может быть использован для совершенствования АЭП, которые работают в частых переходных режимах с интенсивным торможением. Это АЭП электропоездов, электромобилей, робототехнических комплексов в машиностроении, разного рода манипуляторов с электрическим приводом, металлообрабатывающего оборудования и ряда других применений.

### 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 с. – ISBN 978-5-7695-4497-2.
- 2 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 752 с. – ISBN 5-93913-035-6.
- 3 **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.
- 4 **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.
- 5 **Шрейнер, Р. Т.** Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 224 с.
- 6 **Самосейко, В. Ф.** Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник

### 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<sup>nd</sup> ed., erased. – Moscow: Academy, 2004. – 574 p. – ISBN 978-5-7695-4497-2.
- 2 **Besekersky, V. A.** Theory of automatic control systems / V. A. Besekersky, E. P. Popov. – Ed. 4<sup>th</sup>, repr. and added. – Saint Petersburg : Profession, 2007. – 752 p. – ISBN 5-93913-035-6.
- 3 **Evsikov, A. A.** Automated electric drive with frequency control : textbook / A. A. Evsikov, V. A. Kokovin, A. P. Leonov. – Dubna : State University “Dubna”, 2020. – 121 p. – ISBN 978-5-89847-592-5.
- 4 **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.
- 5 **Schreiner, R. T.** Optimal frequency control of asynchronous electric drives / R. T. Schreiner, Yu. A. Dmitrenko. – Chisinau : Stiintza, 1982. – 224 p.
- 6 **Samoseiko, V. F.** Optimal control of an asynchronous motor by the criterion of energy losses /

Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

7 **Фираго, Б. И.** К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 5. – С. 5–16. – ISSN 1029-7448.

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 **Hofer, E.** Numerische Methoden der Optimierung / E. Hofer, R. R. Lunderstadt // Oidenbourg Verlag Munchen Wien, 1975. – 192 p.

V. F. Samoseiko, V. O. Guskov // Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

7 **Firago, B. I.** On the issue of vector control of asynchronous motors / B. I. Firago, D. S. Vasiliev // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2015. – No. 5. – P. 5–16. – ISSN 1029-7448.

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. Studies. for universities. / I. P. Kopylov, F. A. Mammadov, F. Ya. Bepalov. – 3<sup>rd</sup> ed., repr. and added. – Moscow : Higher School, 2001. – 327 p. – ISBN 5-06-003861-0.

10 **Hofer, E.** Numerische Methoden der Optimierung / E. Hofer, R. R. Lunderstadt // Oidenbourg Verlag Munchen Wien, 1975. – 192 p.

*A. D. Petrushin, V. V. Lyakhov, A. I. Melikov*

## OPTIMAL BRAKING MODES OF OPERATION OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

**Abstract.** The paper is devoted to the study of optimal braking modes by asynchronous electric drive using the maximum principle. The optimization criterion is the minimum square of the voltage supplying the electric motor. The controlling influences were the frequency and amplitude of the supply voltage. A mathematical model of a generalized electric machine was used in the calculations. It is determined that for cases when it is necessary to reduce the braking time of an asynchronous electric drive in accordance with the operating conditions of electrical equipment, it is necessary to take into account that reducing the braking time will lead to an increase in electrical losses in the windings of an asynchronous motor and an increase in the amplitude values of current and electromagnetic torque. Increasing the braking time will reduce electrical losses. The dependence of electrical losses in the windings of an asynchronous motor on the optimal braking time is not linear, therefore, it is advisable to choose the braking time on a flat section of this dependence.

**Keywords:** asynchronous electric drive, optimization, braking process, losses in the motor windings, electrical energy, energy efficiency, maximum principle, technological equipment.

**For citation:** Petrushin, A. D. Optimal braking modes of operation of asynchronous electric drive / A. D. Petrushin, V. V. Lyakhov, A. I. Melikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 103–110. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_3\_103.

### 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

**Ляхов Виктор Владимирович**  
ООО «ТМХ – Электротех»,

### Information about the authors

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

**Lyakhov Viktor Vladimirovich**  
TMH – Electrotech LLC,

Начальник бюро пусконаладки  
и внедрения оборудования с ЧПУ  
отдела главного технолога,  
e-mail : Lyahovvv@nevz.com

**Меликов Алимурад Иламинович**

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

Head of the Bureau of Commissioning  
and Implementation of CNC Equipment  
of the Department of the Chief Technologist,  
e-mail: Lyahovvv@nevz.com

**Melikov Alimurad Paminovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Car and Cars Facilities»,  
Postgraduate Student,  
e-mail: alimurad2015@yandex.ru