

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:005.22

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

METHOD OF INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF MULTI-MOTOR FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN BELT CONVEYORS

Семыкина Ирина Юрьевна,
доктор техн. наук, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

Semykina Irina Yu., Dr. Sc. (Engineering),

Негадаев Владислав Александрович,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: negadaev@rambler.ru

Negadaev Vladislav A., C. Sc. (Engineering), Associate professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. Особой категорией промышленного применения электропривода являются горнодобывающие машины угольных шахт. Среди технологических процессов в горнодобывающей промышленности процесс транспортировки угля на поверхность с помощью магистральных ленточных конвейеров является одним из самых важных. Такой конвейер работает в условиях изменяющейся нагрузки. Основные резервы экономии и рационального использования электроэнергии достигаются как за счет уменьшения потерь в электроприводе, так и за счет применения автоматизированного электропривода с преобразователем частоты. Это подтверждает, что задачи исследования характеристик и режимов работы, а также внедрения энергосберегающего электропривода для ленточного конвейера являются актуальными. Статья предлагает методику повышения энергоэффективности многодвигательных частотно-регулируемых электроприводов магистральных ленточных конвейеров, основанную на изменении скорости конвейера и управлении магнитным состоянием двигателя. Даны оценка экономической и энергетической эффективности реализации данной методики.

Abstract. Mining machines of coal mines are a special category of industrial application of the electric drive. Among technological processes in the mining industry, coal transportation to the surface with the help of main belt conveyors is one of the most important processes. Such a conveyor operates under conditions of varying load. The basic reserves of economy and rational use of electric power are achieved both due to reduction of losses in the electric drive, and due to the use of an automated electric drive with a frequency converter. This confirms that the tasks of researching the characteristics and operating modes, as well as the introduction of an energy-saving electric drive for the belt conveyor are relevant. The article suggests a technique for increasing the energy efficiency of multi-motor frequency-controlled electric drives of main belt conveyors, based on changing the speed of the conveyor and controlling the magnetic state of the motor. The estimation of economic and energy efficiency of this method is given.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, энергоэффективность, магистральный ленточный конвейер.

Keywords: frequency-controlled electric drive, frequency converter, energy efficiency, main belt conveyor.

Введение

В настоящее время вопросы эффективного использования энергоресурсов выходят на первый план. Одним из самых важных среди технологических процессов в горнодобывающей промышленности является процесс транспортировки угля на

поверхность с помощью магистральных ленточных конвейеров. Оптимального использования электроэнергии в электроприводе конвейера можно достичь путем применения электропривода с преобразователем частоты.

В фундаментальных исследованиях по частотно-регулируемым преобразователям [1-4] авторами разработаны способы управления частотно-регулируемым электроприводом и методики оценки энергетической эффективности электропривода для оптимизации потребления энергии, однако определенная методика для ленточных конвейеров отсутствует.

Есть два пути повышения энергоэффективности являются очевидными: регулирование скорости и изменение состояния двигателя. Так, в работе [5] предложено научное обоснование возможности повышения энергоэффективности технологических процессов средствами электропривода. Об этом же говорится в работах [6, 7, 8, 9]. При недогрузке конвейера снижается его производительность, и при постоянной скорости конвейера возрастает относительная доля мощности на преодоление момента холостого хода. Поэтому для повышения эффективности работы необходимо работать с переменной скоростью. Скорость должна обеспечивать прежнюю производительность при постоянстве момента нагрузки. На рис. 1 показаны зависимости удельной мощности $P^* = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$ на валу двигателя от удельной производительности $Q^* = \frac{Q}{Q_{\text{ном}}}$ конвейера для постоянной и переменной скоростей ленты.

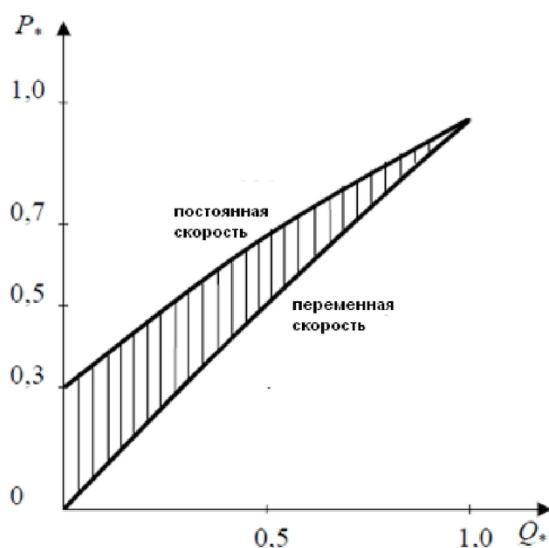


Рис. 1. Зависимости удельной мощности P^* на валу двигателя от удельной производительности Q^* конвейера, $M_x = 0,3M_{\text{ном}}$

Fig. 1. Dependences of the specific power P^* on the motor shaft on the specific productivity Q^* of the conveyor, $M_x = 0,3M_{\text{ном}}$

В публикации [10] подтверждается, что в Польше на конвейерах шахты KWK ANNA экономия электроэнергии при регулировании составила

39 % в расчете на одну тонну. Авторами [11] утверждается, что конвейеры шахт Республики Беларусь потребляют на 1 км длины около 1 млн. кВт·час в год. При этом можно достигнуть потребления менее 0,3 млн. кВт·час в год. Чтобы обеспечить значительную экономию энергии необходимо регулировать скорость конвейеров.

Оптимизация электропривода ленточного конвейера по скорости

Источник [12] подтверждает, что при автоматическом управлении загрузкой ленты конвейеров по принципу поддержания на заданном уровне погонной загрузки обеспечивается экономия электроэнергии, которая равна:

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{1 - k_u}{k_u k_t} 100\%$$

где $k_u = \frac{q_{cp}}{q_{nom}}$; $k_m = \frac{q_{nom}}{q_l}$ – коэффициенты использования конвейера и тары, q_{cp} , q_{nom} – средняя и номинальная погонная загрузка ленты конвейера, q_l – погонный вес ленты (вес 1 м ленты).

Автоматическое управление загрузкой ленты конвейера может быть реализовано применением различных систем автоматического регулирования. Стабилизирующая система автоматического регулирования погонной загрузки (рис. 2) поддерживает последнюю на заданном уровне по закону $q = q_{\text{зад}} = \text{const}$.

У этой системы есть несколько недостатков, таких как большая частота изменения скорости движения ленты и повышенный уровень динамической нагрузки, что приводит к снижению срока службы ленты. Другие недостатки – наличие запаздывания в контуре регулирования и сложность обеспечения требуемых показателей качества регулирования.

Некоторая часть названных недостатков устранена в двухканальной трехпозиционной системе автоматического регулирования погонной загрузки (рис. 3) [12]. В системе используется грузоприемное устройство с регулируемым по производительности питателем и конвейер с регулируемым электроприводом. В качестве управляющего устройства используется трехпозиционный регулятор с двумя каналами управления. Они формируют ступенчатое изменение скорости ленты $\pm\Delta v$ и производительности питателя $\pm\Delta Q$ в функции уровня материала в бункере h .

При изменении входного грузопотока изменяется уровень материала в грузоприемном устройстве. При этом система регулирует скорость ленты и производительность питателя согласно выражениям: $\Delta v = v_0 \pm \Delta v$, $Q = Q_0 \pm \Delta Q$. Такая работа системы регулирования поддерживает постоянную погонную загрузку ленты конвейера.

Таким образом, можно сделать вывод: если есть возможность регулировать скорость ленты, то это нужно делать обязательно.

Таблица. Потребление энергии конвейерами в зависимости от типа электропривода и нагрузки
Table. Energy consumption by conveyors depending on the type of electric drive and load

Тип электропривода конвейера	Потребление энергии при загрузке конвейера, отн. ед.	
	низкой	высокой
Нерегулируемый асинхронный	1,0	1,0
Частотно-регулируемый асинхронный	0,62	0,74
Двухскоростной асинхронный с соотношением угловых скоростей:		
1:2	0,79	0,92
1:3	0,80	0,95

Оптимизация электропривода ленточного конвейера по потерям

Вышеупомянутые системы регулирования рассматривают энергоэффективность электроприводов с позиции воздействия на технологический процесс. Однако способность влиять на технологический процесс не всегда доступна. Для электроприводов одним из важных критериев качества по энергетическим соображениям являются потери мощности. Их снижение также является источником повышения энергоэффективности.

Рассмотрим задачу оптимизации частотно-регулируемого электропривода по потерям мощности в асинхронном двигателе (АД). При выборе метода решения задачи оптимизации полезно знать аналитические свойства экстремальных характеристик двигателя, которые показывают значения параметров в каждой фиксированной точке предписанной области функционирования электропривода при изменении абсолютного скольжения β асинхронного двигателя.

В книге [13] получены результаты расчета экстремальных характеристик асинхронного двигателя, представленные на рис. 4. Графики подтверждают принципиальную возможность обеспечения

функционирования двигателя с заданной скоростью и заданной нагрузкой при различных значениях абсолютного скольжения β .

Варьирование скольжения при заданных технологических параметрах позволяет выявить условия минимизации потерь двигателя. Из графиков на рис. 4 видно, что при номинальной нагрузке минимум потерь асинхронного двигателя достигается при значениях абсолютного скольжения существенно меньших номинального ($\beta_{\text{опт}} < \beta_{\text{ном}}$). При этом главный магнитный поток (главное потокосцепление) больше номинального ($\psi_{m,\text{опт}} > \psi_{m,\text{ном}}$). Для этого необходимо некоторое повышение питающего напряжения в сравнении с номинальным ($u_{1,\text{опт}} > u_{1,\text{ном}}$). В области номинального скольжения двигатель является специфичным элементом электрической цепи, так как при увеличении напряжения статора u_1 ток статора i_1 уменьшается.

Алгоритм поиска параметров магнитного состояния двигателя для минимизации потерь показан на рис. 5. Алгоритм более всего подходит для электроприводов с асинхронным двигателем с пропорциональным законом частотного регулирования, но также может быть использован для других систем управления.

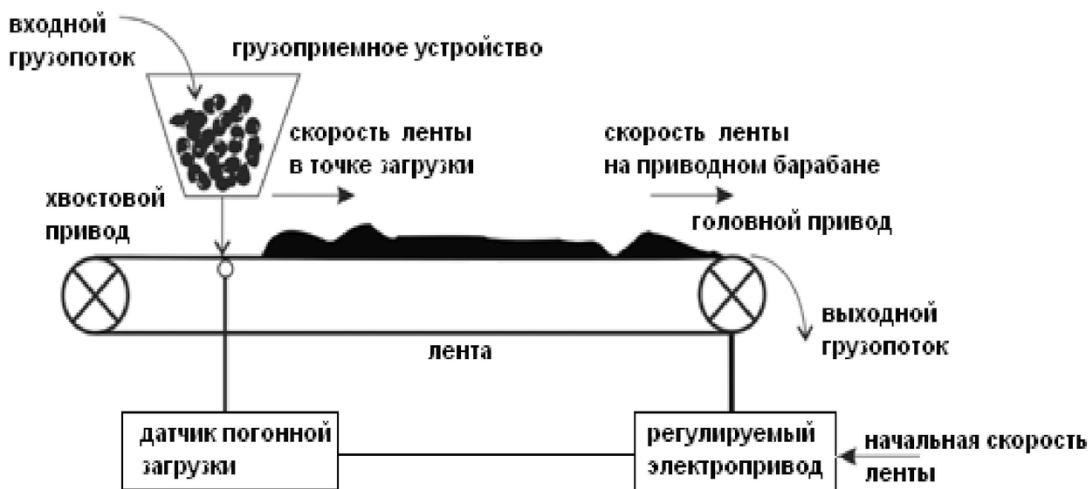


Рис. 2. Структурная схема стабилизирующей системы автоматического регулирования погонной загрузки ленты конвейера

Fig. 2. Structural diagram of the stabilizer system of automatic control of load per unit length of the conveyor belt

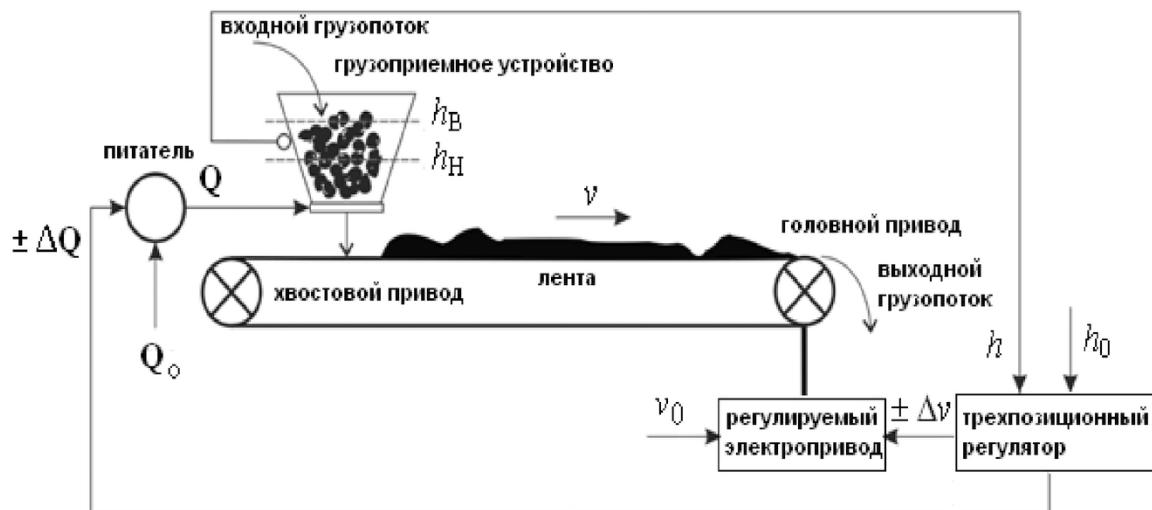


Рис. 3. Структурная схема двухканальной трехпозиционной системы автоматического регулирования погонной загрузки ленты конвейера

Fig. 3. Structural diagram of the two-channel three-position system of automatic control of load per unit length of the conveyor belt

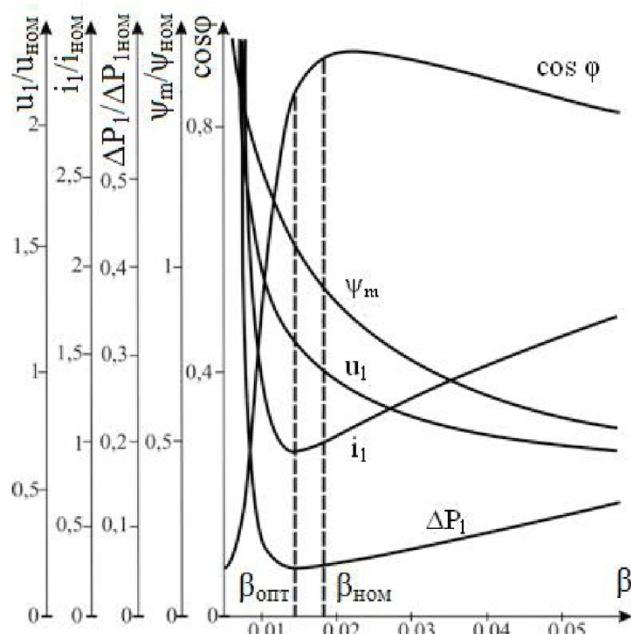


Рис. 4. Характеристики асинхронного двигателя как объекта оптимального управления

Fig. 4. Characteristics of an asynchronous motor as an object of optimal control

Чем больше значение момента и ниже скорость двигателя, тем более критично изменяются потери в функции от абсолютного выражения. Изменение момента значительно влияет на величину оптимального абсолютного скольжения. Таким образом, недопустимо пренебрегать зависимостью оптимального абсолютного скольжения от момента двигателя. При оптимальном управлении магнитный поток изменяется в широких пределах и зависит как от момента, так и от скорости. На магнитный поток в большей мере оказывает влияние момент нагрузки. С увеличением момента влияние скорости на поток уменьшается. Для обеспечения

режима минимальных потерь требуется форсирование магнитного потока относительно его номинального значения, что достигается за счет увеличения напряжения обмотки статора. На рис. 6 показаны характеристики напряжения статора асинхронного двигателя при оптимальном управлении по минимуму потерь [14]. Эти характеристики показывают, что для обеспечения оптимального режима к обмотке статора должно быть приложено более высокое напряжение.

В работе [15] решена задача отыскания промежуточного состояния двигателя, для которого заданное значение потокосцепления статора ψ_1^*

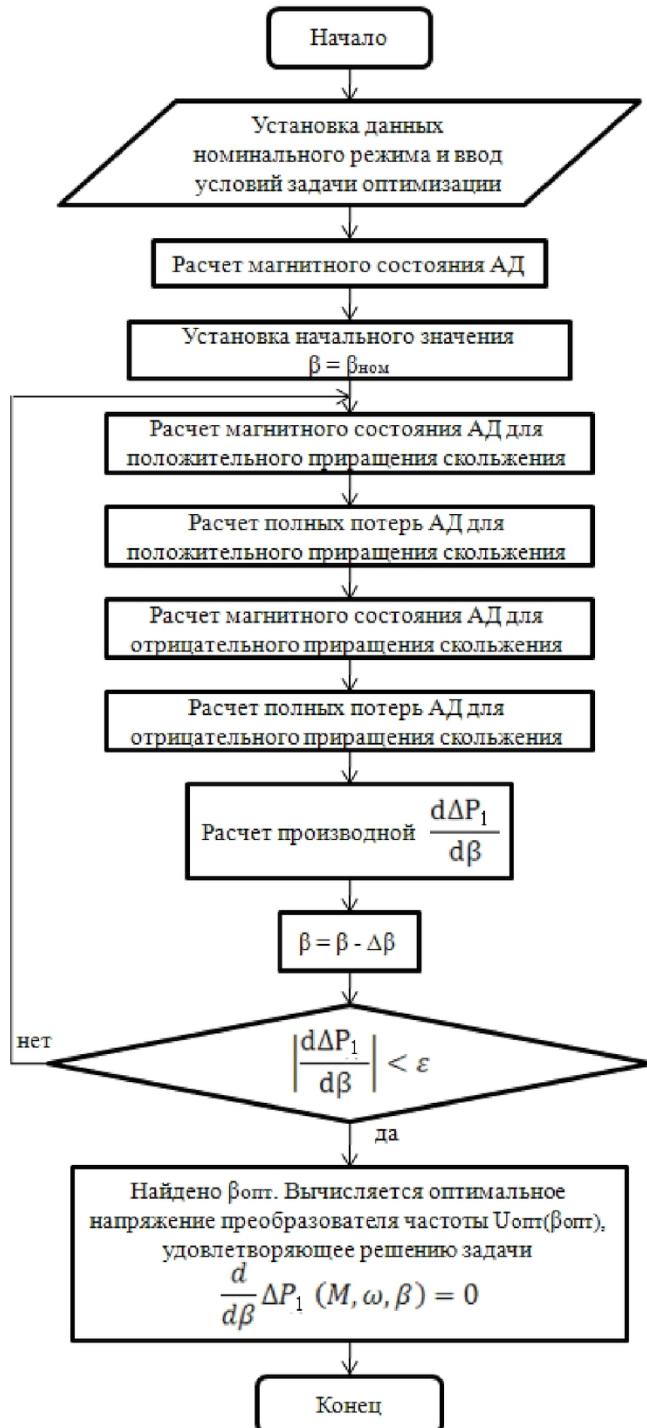


Рис. 5. Алгоритм поиска параметров магнитного состояния асинхронного двигателя для минимизации потерь

Fig. 5. An algorithm for searching the magnetic state parameters of an induction motor to minimize losses

находится между оптимальным заданным значением потокосцепления статора $\psi_1^{\text{опт-}M}$ и оптимальным заданным значением потокосцеплением статора $\psi_1^{\text{опт-}c}$, обеспечивающим минимизацию мощности электрических потерь ΔP_s . При этом обеспечивается минимизация суммы мощностей электрических потерь и потерь в стали $\Delta P_s + \Delta P_c$. Предло-

жена методика численного отыскания оптимального заданного значения потокосцепления статора $\psi_1^{\text{опт-}c}$, обеспечивающего минимизацию $\Delta P_s + \Delta P_c$. Методика отыскания заданий для оптимизации по суммарным потерям асинхронного двигателя показана на рис. 7.

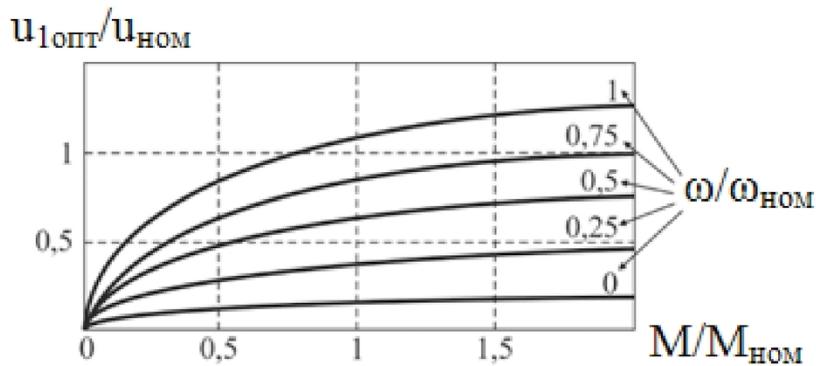


Рис. 6. Напряжение статора асинхронного двигателя при оптимальном управлении по минимуму потерь

Fig. 6. Stator voltage of an induction motor with optimum control for minimum losses

Достоинством предложенной методики определения $\psi_1^{\text{опт-с}}$ является ее применимость для систем управления двигателями переменного тока, которые предусматривают возможность регулирования состояния двигателя, например, для векторного управления и прямого управления моментом.

Выходы

Приведенный выше анализ показывает, что эффективность создается в результате не только простой установки преобразователя частоты для осуществления регулирования частоты, но и за счет использования правильно выбранной и сконфигурированной системы управления.

Исследования показали, что для ленточного конвейера фактическая экономия энергии при внедрении преобразователей частоты составила от

1,5 до 10 %. При оптимизации магнитного потока экономия может возрасти до 40 %.

На основании вышеприведенного анализа различных способов оптимизации потерь энергии сформирована методика выбора оптимального режима управления для электропривода магистрального ленточного конвейера (рис. 8). Эта методика может быть полезна в инженерной практике персонала шахт, где эксплуатируются такие конвейеры, а также в проектных и исследовательских компаниях при разработке новых или модернизации существующих ленточных конвейеров.

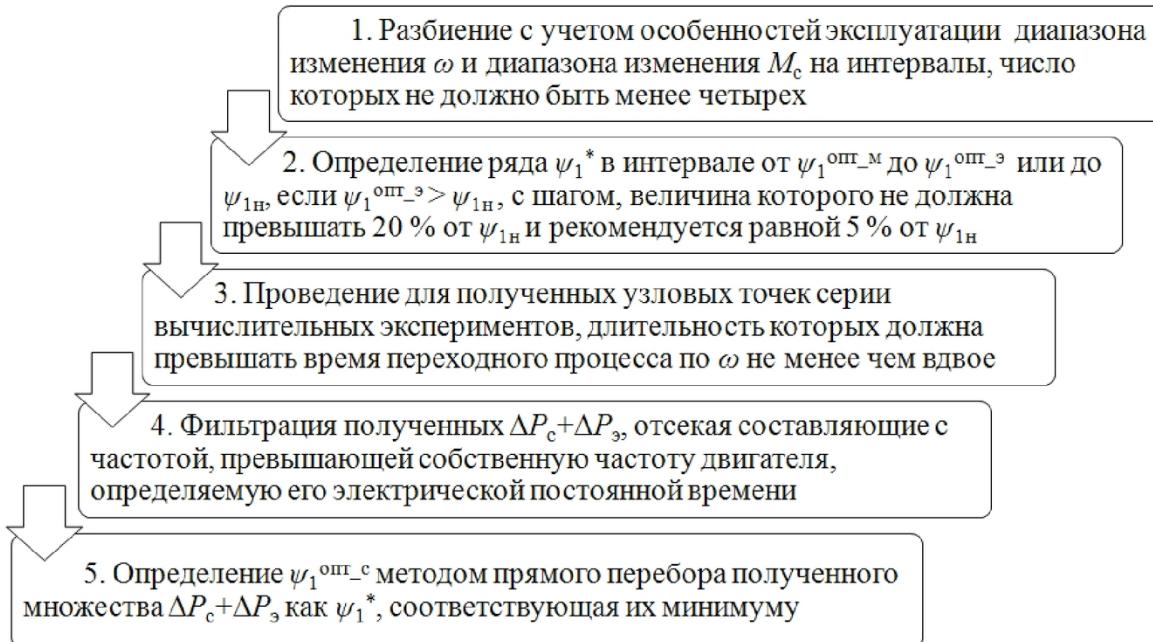


Рис. 7. Методика отыскания заданий для оптимизации по суммарным потерям асинхронного двигателя

Fig. 7. Methodology of finding assignments for optimization of total losses of an induction motor

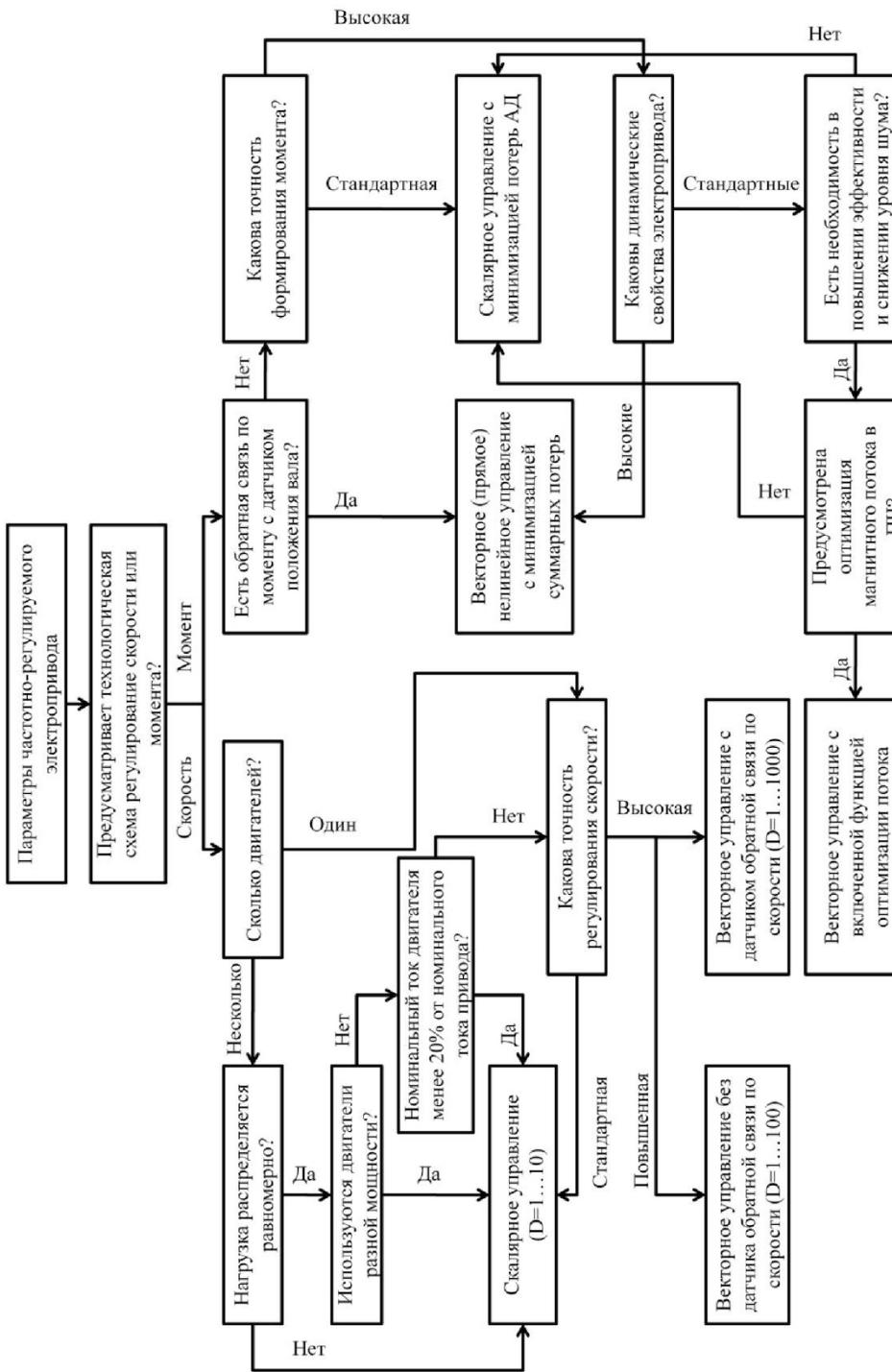


Рис. 8. Методика выбора оптимального режима управления для электропривода ленточного конвейера

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bose, B.K. Power Electronics and AC Drives, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1986.
2. Kostenko, M.P. and Piotrovsky, L.M. Electrical Machines, Vol. I, Mir, Moscow, 1974.
3. Leonard, W. Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, 1985.
4. Ильинский, Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. – Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практ. пособие в 5 кн. – Кн. 2. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.
5. Beshta O.S. Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes, Scientific Bulletin NSU, 2012, Vol. 4, pp. 98-107. The original source of material: <http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/34-04/530-2012-4-beshta/0>.
6. Краснов И.Ю. Методы и средства энергосбережения на промышленных предприятиях: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 186 с.
7. Электропривод и автоматизация промышленных установок как средства энергосбережения / И.А. Авербах, Е.И. Барац, И.Я. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov. – Екатеринбург: Свердловгосэнергонадзор, 2002. – 28 с.
8. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод как средство энергосбережения / И.А. Авербах, Е.И. Барац, И.Я. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov // Энергетика региона. – Екатеринбург, 2002. – №2(45). – С. 34–35.
9. Бабокин Г.И. Энергосбережение в электроприводе конвейера // Изв. вузов. Горный журнал. – 2002. – №1. – С. 122–125.
10. Zaklika M., Kollek M. and Tytko C. Belt conveyors with adjustable speed, BSS BARTEC, plant «Menden», Germany, CARBO-BARTEC, Poland, mine «ANNA», Poland, 1996. The original source of material: <http://www.bartec-sst.ru/images/work/Media/for-conveyance.pdf>.
11. Кучерявенко, В.Ф. Регулируемый электропривод конвейеров – основа безопасности и эффективности транспортировки грузов / В.Ф. Кучерявенко, А.А. Семченко, ОАО «Белгорхимпром». – Минск, Республика Беларусь: первоисточник материала: <http://tbo.technoshans.com/files/tbo-2007-1-38.pdf>.
12. Медведев, А.Е. Автоматизация производственных процессов: учеб. пособие / А.Е. Медведев, А.В. Чупин. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2009. – 325 с.
13. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург УРО РАН, 2000. – 654 с.
14. Braslavskiy, I.Ya. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / I.Ya. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov, B.N. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
15. Семыкина, И.Ю. Повышение энерго- и ресурсоэффективности горных машин средствами регулируемого электропривода, автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Томск, 2014.

REFERENCES

1. Bose, B.K. Power Electronics and AC Drives, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1986.
2. Kostenko, M.P. and Piotrovsky, L.M. Electrical Machines, Vol. I, Mir, Moscow, 1974.
3. Leonard, W. Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, 1985.
4. Il'inskiy, N.F. Energosberezhenie v elektroprivode / N.F. Il'inskiy, Yu.V. Rozhankovskiy, A.O. Gornov. – Energosberegayushchaya tekhnologiya elektronsnabzheniya narodnogo khozyaystva: prakt. posobie v 5 kn. – Kn. 2. – M.: Vyssh. shk., 1989. – 127 s.
5. Beshta O.S. Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes, Scientific Bulletin NSU, 2012, Vol. 4, pp. 98-107. The original source of material: <http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/34-04/530-2012-4-beshta/0>.
6. Krasnov I.Yu. Metody i sredstva energosberezheniya na promyshlennykh pred-priatyakh: uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2012. – 186 s.
7. Elektroprivod i avtomatizatsiya promyshlennykh ustavok kak sredstva energosberezheniya / I.A. Averbakh, E.I. Barats, I.Ya. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov. – Ekaterinburg: Sverdlovgospenergonadzor, 2002. – 28 s.
8. Chastotno-reguliruemyy asinkhronnyy elektroprivod kak sredstvo energosberesheniya / I.A. Averbakh, E.I. Barats, I.Ya. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov // Energetika regiona. – Ekaterinburg, 2002. – №2(45). – S. 34–35.
9. Babokin G.I. Energosberezhenie v elektroprivode konveyera // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. – 2002. – №1. – S. 122–125.

10. Zaklika M., Kollek M. and Tytko C. Belt conveyors with adjustable speed, BSS BARTEC, plant «Menden», Germany, CARBO-BARTEC, Poland, mine «ANNA», Poland, 1996. The original source of material: <http://www.bartec-sst.ru/images/work/Media/for-conveyance.pdf>.
11. Kucheryavenko, V.F. Reguliruemyy elektroprivod konveyerov – osnova bezo-pasnosti i effektivnosti transportirovki gruzov / V.F. Kucheryavenko, A.A. Semchenko, OAO «Belgorkhimprom». – Minsk, Respublika Belarus': pervoistochnik materiala: <http://tbo.technoshans.com/files/tbo-2007-1-38.pdf>.
12. Medvedev, A.E. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov: ucheb. posobie / A.E. Medvedev, A.V. Chupin. – Kemerovo: Izd-vo KuzGTU, 2009. – 325 s.
13. Shreyner, R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremenno-go toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty. – Ekaterinburg URO RAN, 2000. – 654 s.
14. Braslavskiy, I.Ya. Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / I.Ya. Braslavskiy, S.Sh. Ishmatov, V.N. Polya-kov. – M.: Akademiya, 2004. – 256 s.
15. Semykina, I.Yu. Povyshenie energo- i resursoeffektivnosti gornykh ma-shin sredstvami reguliruemogo elektroprivoda, avtoreferat dissertatsii na soiska-nie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk, Tomsk, 2014.

Поступило в редакцию 23.03.2017

Received 23 March 2017