

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА

На выбор системы управления электроприводом оказывают влияние разного рода дестабилизирующие факторы, обусловленные нелинейными характеристиками управляемых преобразователей и электрических машин, ограниченной точностью изготовления и конечной жесткостью элементов кинематических цепей, сложной природой технологических процессов, а также неполнотой априорной информации о параметрах и свойствах объекта управления. В этой связи в большинстве случаев нельзя добиться желаемых результатов, используя для построения систем управления сложными техническими объектами классические методы синтеза. В каждом конкретном случае требуется специальный подход, позволяющий избежать детального анализа целого спектра действующих на систему дестабилизирующих факторов, все многообразие которых можно условно разделить на параметрические (внутренние) и координатные (внешние) возмущения. Наиболее сложными электромеханическими системами являются многодвигательные технологически взаимосвязанные электроприводы. Такие системы применяются на предприятиях ряда отраслей промышленности (металлургической, горнодобывающей, строительной, полиграфической и др.) в виде транспортных установок, в которых электродвигатели механически связаны между собой через обрабатываемое изделие, или передачи за счет сил трения движущих моментов общему упругому тяговому органу. В первом случае к системе управления предъявляется требование обеспечения регулируемого натяжения ленты, во втором – приводы должны поддерживать оптимальные соотношения между набегающими и сбегаящими ветвями тягового органа. В статье приведены результаты исследований систем оптимального управления позиционным электроприводом. В качестве базового устройства в комбинированной системе управления может быть применена многоканальная задающая модель, которая формирует задающие воздействия, изменяющиеся во времени пропорционально желаемому изменению управляемых координат, и компенсирует ошибку отслеживания. Если, кроме задающей модели, используется и блок наблюдения за соответствием действительного режима заданному, то система управления будет иметь две степени свободы и, следовательно, точность отработки заданного режима повысится.

Ключевые слова: электропривод, оптимизация, многодвигательный, двигатель, изменение нагрузки, момент.

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы характеризуются быстрым развитием силовых полупроводниковых преобразователей и микропроцессорной техники, что позволило применить отработанные методы теории регулирования для решения разнообразных задач управления электроприводом. Наиболее перспективными являются комбинированные системы управления, которые обеспечивают быстрое и точное регулирование. Алгоритмы функционирования таких систем можно получить, применив методы сведения ошибки к нулю, наблюдения за эквивалентным возмущением, управления с прямой передачей, а также метод управления со скользящим режимом.

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные системы электропривода циклического действия (приводы экскаваторов, подъемных машин, промышленных манипуляторов и других механизмов) строятся по принципу подчиненного регулирования координат. В большинстве случаев главным требованием к механизмам циклического действия является перемещение рабочего органа на заданное расстояние за минимальное время. За оптимальный режим работы многоприводной системы такого типа принимают режим, который обеспечивает равенство запасов тяговых возможностей. Оптимальные отношения тяговых усилий приводных барабанов должны быть обеспечены системой автоматического управления приводами на всем протяжении рабочего цикла.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Оптимизация системы управления многодвигательным электроприводом состоит при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа.

Разность натяжений в набегающей и сбегаящей ветвях тягового органа ($S_{нб} - S_{сб} = F_0$) в статически неуравновешенной системе вертикального подъемника зависит от положения концевых грузов и может меняться от максимального ($F_{0,max}$) до минимального ($F_{0,min}$) значений при максимальной протяженности пути H_m . Тогда для текущего перемещения x можно записать зависимость $F_0 = f(x)$ в статическом режиме следующим образом:

$$F_0 = K_q Q + (H_m - 2x) q_t, \quad (1)$$

где q_t – составляющая усилия F_0 при перемещении концевых грузов на 1 м, Н/м; $K_q Q$ – приведенная нагрузка; H_m – максимальное заданное перемещение концевых грузов.

Из уравнения (1) следует, что в течение одной подъемной операции F_0 не только изменяется в функции перемещения, но и будет изменять знак, если $H_m q_t > K_q Q$. Поэтому при построении системы управления нужно учитывать возможность перехода двигателя с двигательного режима в тормозной, т.е. система должна работать устойчиво и в области прерывистых токов.

Тяговые возможности привода определяются углами a_{10} , a_{20} , a_{30} обхвата приводных барабанов тяговым органом. Если эти углы связаны соотношениями $a_{10} = K_1 a_{20}$, $a_{10} = K_2 a_{30}$, то в общем случае максимально возможное тяговое усилие F_0 , развиваемое всеми двига-

телями, углы рабочего проскальзывания a_1, a_2, a_3 и соотношения тяговых усилий отдельных двигателей $F_1/F_0, F_2/F_0, F_3/F_0$ определяют из выражений:

$$\begin{cases} F_0 = S_{сб} \left[e^{\mu a} 1^{\left(1 + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)} - 1 \right]; \\ a_1 = \frac{K_1 K_2}{\mu (K_1 + K_2 + K_1 K_2)} \ln S_0; \\ a_2 = \frac{a_1}{K_1}; a_3 = \frac{a_1}{K_2}; \\ F_1/F_2 = \left(S_0 - S_0^{a_0} \right) / \left(S_0^{a_0} - 1 \right); \\ F_2/F_3 = \left(S_0^{\frac{K_1 K_2 + K_2}{a_0}} - S_0^{K_2/a_0} \right) / \left(S_0^{K_1/a_0} - 1 \right), \end{cases} \quad (2)$$

где μ – коэффициент сцепления тягового органа с футеровкой барабанов; $K_0 = K_1 + K_2 + K_1 K_2$; $S_0 = S_{нб}/S_{сб}$.

При одинаковых углах обхвата ($a_1 = a_2 = a_3$) оптимальное отношение тяговых усилий любых соседних барабанов определяется по формуле

$$F_i/F_{i+1} = S_0^{1/n},$$

где n – число приводных барабанов.

Отсчет приводных барабанов ведется от набегавшей ветви с усилием $S_{нб}$. При работе в оптимальном режиме отношения F_1, F_2, F_3 к K_0 определяется из выражений:

$$\begin{cases} F_1/F_0 = \left(S_0 - S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0} \right) / (S_0 - 1); \\ F_2/F_0 = \left(S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0} - S_0^{K_1/a_0} \right) / (S_0 - 1); \\ F_3/F_0 = \left(S_0^{K_1/a_0} - 1 \right) / (S_0 - 1). \end{cases} \quad (3)$$

Определим усилия F_1, F_2, F_3 в период одного рабочего цикла без учета динамических составляющих при изменении F_0 от $+F_{0, \max}$ до $-F_{0, \max}$. Примем $K_1 = K_2$ и в соответствии с приведенными зависимостями составим структурную схему алгоритма решения данной задачи на ЭВМ (рис. 1). Графики F_1, F_2, F_3 приведены на рис. 2. Из графиков видно, что оптимальная нагрузка на средний привод составляет в любом положении концевых грузов примерно 1/3 от общего усилия F_0 и является симметричной относительно осей координат. Нагрузки других двигателей в пределах одного цикла существенно меняются. Причем при положительном общем движущем моменте первый двигатель (со стороны набегавшей ветви) должен развивать наибольший момент, третий – наименьший.

При переходе в тормозной режим, обусловленный изменением знака F_0 , происходит перераспределение нагрузок между первым и третьим двигателями и в отношении нагрузки они меняются местами: третий двигатель развивает максимальный тормозной момент, а первый – минимальный.

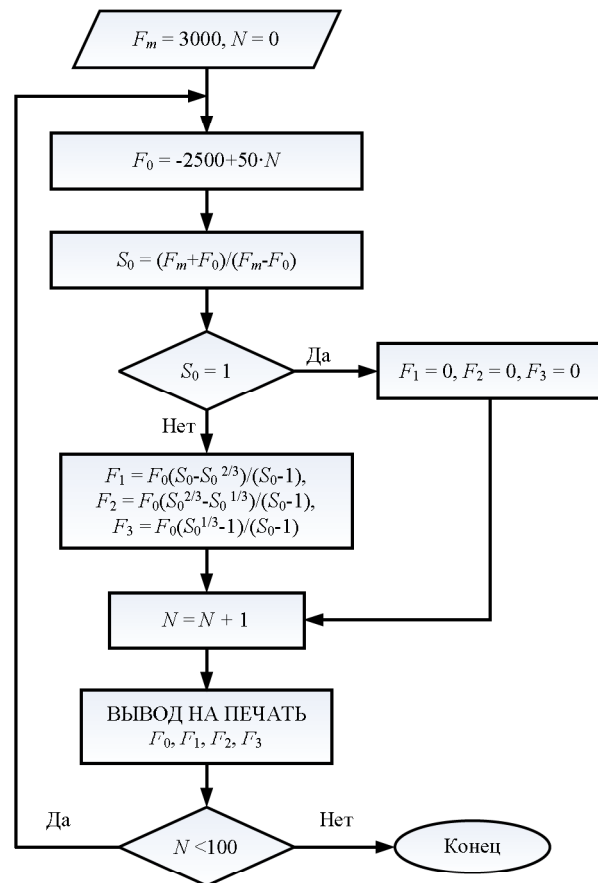


Рис. 1. Структурная схема алгоритма определения движущихся усилий

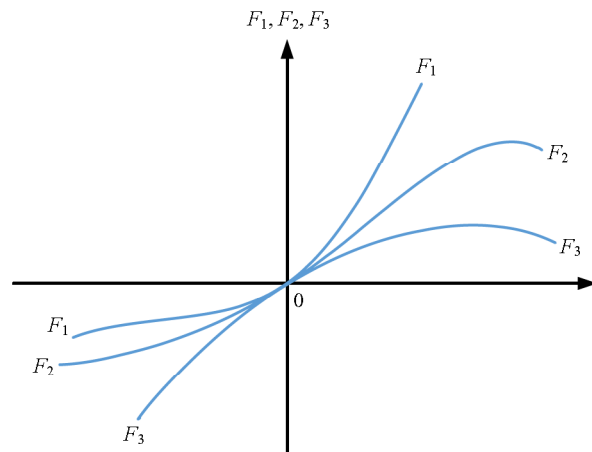


Рис. 2. Графики изменения движущих усилий в течение одного цикла

В соответствии с таким характером распределения общего требуемого движущего (тормозного) момента между отдельными двигателями должна строиться система управления приводом. Следует учитывать то обстоятельство, что практически во всех случаях работы реальных систем данного типа будет иметь место переход через зону прерывистых токов.

Графики изменения скорости и тока якорной цепи при знакопеременном статическом моменте, полученные на ЭВМ (см. рис. 2) по уравнениям (3) и структурной схеме алгоритма (рис. 1), показывают, что для достижения режима с заданным законом изменения скорости, кроме обеспечения устойчивого функциониро-

вания контура тока каждого из двигателей, привод должен иметь общий контур регулирования скорости с соответствующей задающей моделью (ЗМ).

Укрупненная функциональная схема управления многодвигательной системой привода представлена на рис. 3.

Динамика механической системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} R^{-2} J_0 \frac{dV_d}{dt} = (M_{д1} + M_{д2} + M_{д3}) \frac{I}{R_{п.ш}} - F_0; \\ X_d = \int V_d(t) dt, \end{cases} \quad (4)$$

где V_d – линейная скорость перемещения конечных грузов; X_d – пройденный путь; J_0 – суммарный приведенный момент инерции всех движущихся звеньев, включая моменты, развиваемые отдельными двигателями; $R_{п.ш}$ – радиус приводных шкивов; КРТ, КРТ2, КРТ3 – контуры регулирования тока двигателей, включая преобразовательные агрегаты и регуляторы тока (выбор параметров осуществляется для каждого двигателя индивидуально); ЗМ – задающая модель, формирующая управление сигналы $U_{п.}$, $U_{с.}$, $U_{а.}$, пропорциональные соответственно заданным диаграммам изменения положения конечных грузов X , скорости V и ускорения a ; РП – регулятор положения; БФЗТ – блок формирования сигналов $U_{3.Т1}$, $U_{3.Т2}$, $U_{3.Т3}$, пропорциональных заданным значениям токов двигателей $I_{я1}$, $I_{я2}$, $I_{я3}$; $\Delta U_{П}$ – сигнал ошибки по положению; $U_{П.м}$ – сигнал, пропорциональный заданному перемещению $X_m = H_m$; БСФН – блок формирования статических нагрузок F_0 , F_1 , F_2 , F_3 по формулам (1) и (2).

Для построения общей структурной схемы системы управления нужно определить алгоритмическую структуру БФСН, используя зависимости (1) и (2).

Входной переменной является перемещение $x_{П.}$, выходными величинами – усилие F_0 и отношения F_1/F_0 , F_2/F_0 , F_3/F_0 . Такая схема представлена на рис. 4.

В процессе движения системы пройденный путь $x_{П.}$ меняется от нуля до H_m . Соответственно, изменяются усилие F_0 и отношение S_0 . Построение БФСН должно осуществляться на базе микропроцессорной техники.

Для упрощения функциональных схем системы управления графики $f_0 = F_1/F_0$; $f_2 = F_2/F_0$ и $f_3 = F_3/F_0$, полученные по алгоритму определения F_1 , F_2 , F_3 , F_0 (см. рис. 1), можно аппроксимировать отрезками прямых линий, как показано на рис. 5. Как следует из графиков, все кривые 1, 2, 3, соответствующие первому, второму и третьему двигателям, пересекают вертикальную ось при одинаковых коэффициентах f_i , равных $f_1 = f_2 = f_3 = 1/3 \approx 0,33$.

Это свидетельствует о том, что при малых нагрузках, близких к режиму холостого хода, двигатели должны развивать примерно одинаковые моменты. При увеличении нагрузки F_0 крайний двигатель со стороны большего по абсолютной величине усилия, действующего на орган навивки ($S_{НБ}$ и $S_{СБ}$), в оптимальном режиме будет развивать наибольший момент, средний должен создавать момент, примерно равный $1/3$ суммарного $M_{ДВ}$, а момент третьего двигателя $M_{Д3}$ будет равен разности $M_{Д1} - M_{Д2}$.

Если аппроксимировать графики на рис. 5 прямыми, показанными штриховыми линиями, то относительные нагрузки будут определяться из выражений:

$$\begin{cases} f_1 = 0,33 + 0,21f_0; \\ f_2 = 0,33; \\ f_3 = 0,33 - 0,21f_0, \end{cases} \quad (5)$$

где $f_0 = F_0/|F_{0.маx}|$, $F_{0.маx} = KQ + q_T H_{П.}$

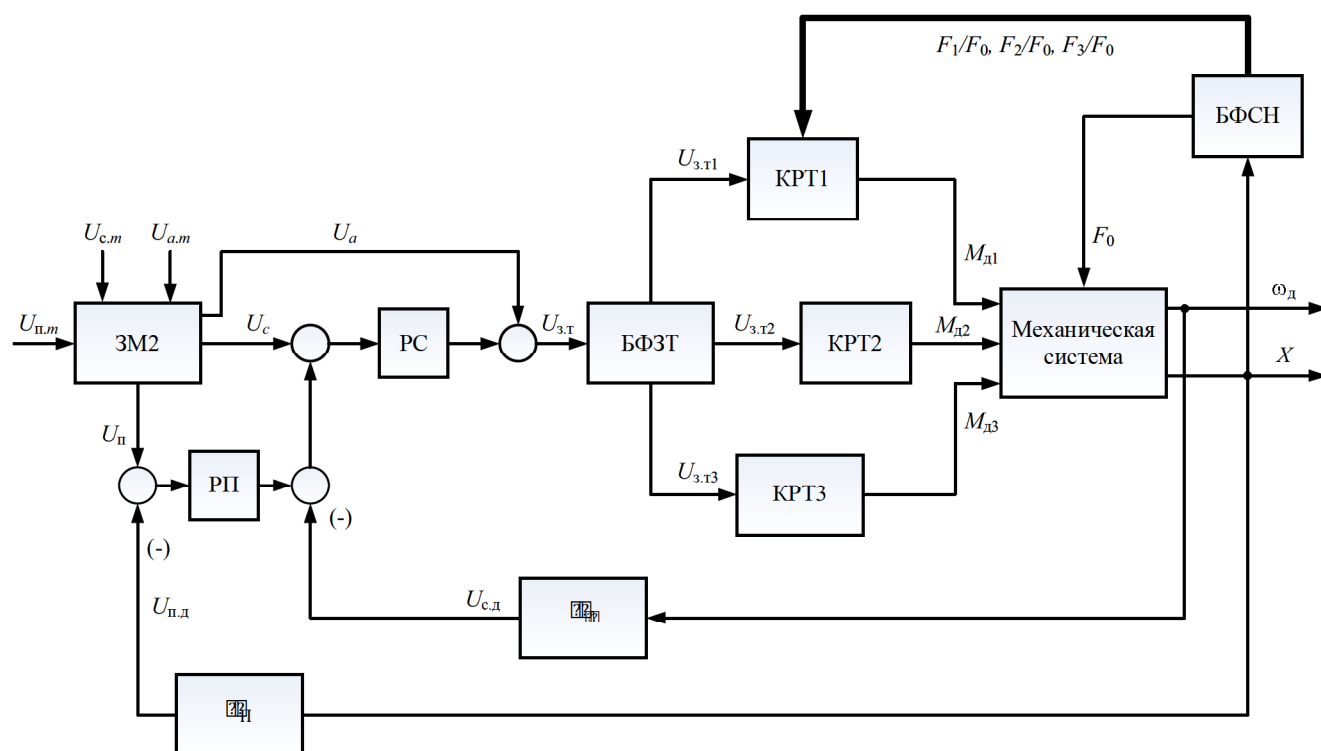


Рис. 3. Функциональная схема управления многодвигательным электроприводом

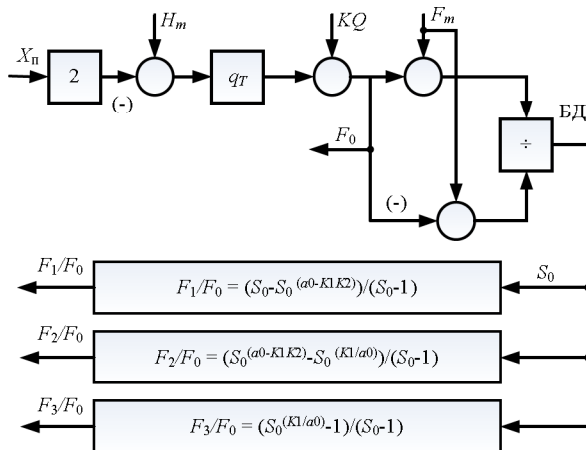


Рис. 4. Схема определения движущих усилий (в относительных единицах)

В результате такого представления зависимостей усилий F_1, F_2, F_3 от общего тягового усилия F_0 существенно упрощается структура БФСН, показанная на рис. 4.

Согласно формулам (5) при любом значении коэффициента f_0 (при любом положении конечных грузов) сумма коэффициентов f_1, f_2, f_3 равна единице, т.е. всегда привод передает требуемый суммарный момент $M_{\text{Д}}$. Структурная схема БФСН, соответствующая аппроксимированным характеристикам $f_i(F_0)$, показана на рис. 6, из которого ясно, что для определения относительных нагрузок на двигателе достаточно по текущему перемещению $x_{\text{П}}$, приведенной нагрузке KQ и максимальному заданному перемещению конечных грузов $H_{\text{П}}$ вычислить коэффициент f_0 .

С помощью блоков перемножения БП1, БП2 и БП3 полный управляющий сигнал $U_{\text{З.Т}}$, включающий как статическую, так и динамическую составляющие, распределяется между контурами токов каждого из двигателей по оптимальному закону с помощью коэффициентов f_1 . Так как коэффициенты $K_{\text{T1}}, K_{\text{T2}}, K_{\text{T3}}$ выбираются по отношению к максимальному полному сигналу, то в данной системе с ПИ-регуляторами тока всегда должен устанавливаться режим работы с требуемым (оптимальным) распределением движущего момента между двигателями. Переменная нагрузка двигателей должна учитываться при выборе номинальной мощности отдельных двигателей и определении полной потребляемой мощности привода.

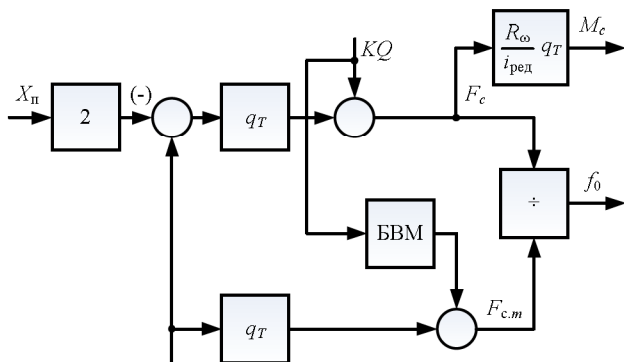


Рис. 5. Схема блока формирования статической нагрузки

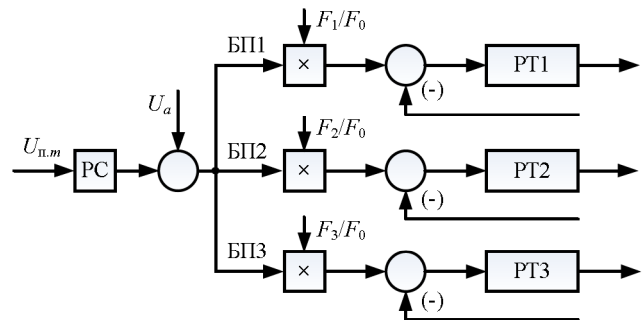


Рис. 6. Функциональная схема БФСН

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного выше ясно, что с помощью ЗМ, формирующей оптимальные задающие воздействия, пропорциональные желаемым диаграммам изменения управляемых переменных (скорости и ускорения), достигается оптимизация технологического процесса по режиму управления.

Комбинированная система подчиненного регулирования обеспечивает оптимизацию по переходными процессам (управляемые переменные практически без ошибок воспроизводят задающие воздействия). Третий критерий оптимальности состоит в оптимальном распределении нагрузки между двигателями согласно коэффициентам f_1, f_2, f_3 . В рассмотренной системе в отличие от известных особое значение приобретает использование специального задающего воздействия по ускорению с блоками перемножения в прямых передачах. Такие системы относятся к классу комбинированных по управляющему воздействию. Полученные структурные схемы и алгоритмы функционирования как системы управления, так и ее отдельных блоков могут быть использованы при выборе типов неуравновешенных подъемных установок сверхглубоких шахт из двух и трех двигательных приводом.

Такие системы имеют установленную мощность привода, на 20-30% превышающую мощность привода статически уравновешенных систем подъема, но расход электроэнергии уменьшается на 7-10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабо К.Я. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью: учеб. пособие. Нерюнгри. Изд-во ТИ(ф) СВФУ, 2015. 56 с.
2. Чермалых В.М., Афанасьев Ю.А., Чермалых Т.В. Построение адаптивных систем позиционного управления электроприводами машин и установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1992. № 10. С. 73-77.
3. Алтухов Е.И., Чермалых Т.В. Алгоритмическое обеспечение микропроцессорного управления машинами и установками циклического действия // Вестник Киевского политехн. ин-та. Горная электромеханика и автоматика. 1993. Вып. 2. С. 20-29.
4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965. 466 с.
6. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981. 368 с.
7. Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. Автоматические системы с разрывным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.

8. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. М.: Недра, 1978. 398 с.
9. Липковский К.А., Чермалых Т.В. Адаптивная система управления промышленными установками с вентильны-

ми двигателями // Тез. докл. 1-й Украинской конференции по автоматическому управлению. 18-23 мая 1994. Ч.2. Киев, 1994. 428 с.

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTIMIZATION OF COMBINED ELECTRIC MOTOR DRIVE CONTROL WHEN LOAD CHANGES AS A FUNCTION OF THE POSITION OF THE WORKING ELEMENT

Kamil Ya. Shabo

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric Drive and Industrial Automation, Ammosov North-Eastern Federal University, Technical Institute (branch), Neryungri, Russia. E-mail: kamilshabo@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5171-835X>.

The choice of the electric drive control system is provided by various destabilizing factors due to the nonlinear characteristics of the controlled converters and electric machines, limited manufacturing accuracy and final stiffness of the elements of the kinematic circuits, the complex nature of technological processes as well as incomplete a priori information about the parameters and properties of the control object. In this regard, in most cases it is impossible to achieve the desired results using classical synthesis methods to build control systems for complex technical objects. In each case, a special approach is required to avoid a detailed analysis of the whole spectrum of destabilizing factors acting on the system, all the variety of which can be divided into parametric (internal) and coordinate (external) disturbances. The most complex electromechanical systems are multi-motor technologically interconnected electric drives. Such systems are used at the enterprises of a number of industries (metallurgical, mining, construction, printing, etc.) in the form of transport units in which the electric motors are mechanically connected through the processed product or transmission due to the friction forces of the driving moments to the general elastic traction body. In the first case, the control system is required to ensure the adjustable tension of the belt, in the second one, the drives must maintain optimal relations between the oncoming and escaping branches of the traction body. The article presents the results of studies of optimal control systems of positional electric drive. As a basic device in the combined control system, a multi-channel master model can be used, which forms the master actions that change in time in proportion to the desired change in the controlled coordinates and compensates for the tracking error. If, in addition to the master model, the monitoring unit is used to monitor the compliance of the actual mode with the specified one, the control system will have two degrees of freedom and, therefore, the accuracy of the specified mode will increase.

Keywords: Electric drive, optimization, multi-motor, motor, load change, torque.

REFERENCES

1. Shabo K.Ya. Sistemy optimalnogo upravleniya pozitsionnym tiristornym elektroprivodom s mnogokanalnoy

zadayushchey modelyu [Optimal control systems for positional thyristor electric drive with multichannel master model]: Textbook. Neryungri: Publishing center of TI (f) SVFU, 2015. 56 p. (In Russian)

2. Chermalykh V.M., Afanasyev Yu.A., Chermalykh T.V. Construction of adaptive systems for position control of electric drives of machines and installations // Izv. vuzov. Gornyi zhurnal [Bulletin of universities. Mining journal]. 1992, no. 10, pp. 73-77. (In Russian)
3. Altukhov E.I., Chermalykh T.V. Algorithmic support of microprocessor control of machines and installations of cyclic action. Vestnik Kievskogo politekhn. in-ta. Gorn. elektromekhanika i avtomatika [Bulletin of Kiev Polytechnic Institute. Mining electromechanics and automation]. 1993. Iss. 2, pp. 20-29.
4. Kuo B. Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh system upravleniya [The theory and design of digital control systems]. Moscow: Mechanical Engineering, 1986. 448 p. (In Russian)
5. V.A. Ditkin, A.P. Prudnikov. Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu [Handbook of operational calculus]. Moscow: Higher School, 1965. 466 p. (In Russian)
6. Utkin V.I. Skolzyashchie rezhimy v zadachakh optimizatsii i upravleniya [Sliding modes in optimization and control tasks]. Moscow: Nauka, 1981. 368 p. (In Russian)
7. Bortsov Yu.A., Yunger I.B. Avtomaticheskie sistemy s razryvnym upravleniem [Automatic systems with discontinuous control]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 168 p. (In Russian)
8. Chermalykh V.M., Rodkin D.I., Kanevsky V.V. Sistemy elektroprivoda i avtomatiki rudnichnykh statsionarnykh mashin i ustanovok [Systems of electric drive and automation of mine stationary machines and installations]. Moscow: Nedra, 1978. 398 p. (In Russian)
9. Lipkovskii K.A., Chermalykh T.V. Adaptive control system for industrial installations with valve motors. Tез. dokl. 1-i Ukrainskoy konferentsii po avtomaticheskomy upravleniyu. 18-23, maya 1994 [Abstracts of 1-st Ukrainian conference on automatic control. 18-23 May 1994]. Kiev, 1994. 428 p.

Шабо К.Я. Оптимизация системы комбинированного управления электроприводом при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 17-21. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-17-21](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21)

Shabo K.Ya. Optimization of Combined Electric Motor Drive Control when Load Changes as a Function of the Position of the Working Element. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 17-21. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-17-21](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21)