

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

А. Б. Бекбаев, Д. Б. Акпанбетов, А. К. Жумаев

Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева
ул. Сатпаева, 22, Алматы, 050013, Казахстан. E-mail: darhan_ba@mail.ru

Рассматриваются вопросы оптимального управления многодвигательным асинхронным электроприводом с преобразователями частоты ленточного конвейера с применением метода принципа максимума. Для оптимального управления выбран интегральный критерий оптимальности, обеспечивающий требования синхронного вращения электродвигателей конвейера. Составлен алгоритм оптимального управления с применением метода последовательных приближений и исследован в системе MATLAB 7.0; по результатам расчета получена оптимальная кривая управления, по передаточной функции которой определен закон оптимального управления многодвигательным электроприводом ленточного конвейера.

Ключевые слова: многодвигательный асинхронный электропривод, частотное регулирование, моделирование, оптимальное управление, принцип максимума.

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ БАГАТОДВИГУННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

А. Б. Бекбаєв, Д. Б. Акпанбетов, А. К. Жумаєв

Казахський національний технічний університет імені К. І. Сатпаєва
вул. Сатпаєва, 22, Алмати, 050013, Казахстан. E-mail: darhan_ba@mail.ru

Розглядаються питання оптимального управління багатодвигунним асинхронним електроприводом з перетворювачами частоти стрічкового конвеєра із застосуванням методу принципу максимуму. Для оптимального управління обрано інтегральний критерій оптимальності, що забезпечує вимоги синхронного обертання електродвигунів конвеєра. Складено алгоритм оптимального управління із застосуванням методу послідовних наближень та досліджено у системі MATLAB 7.0; за результатами розрахунку отримано оптимальну криву управління, за передавальною функцією якої визначено закон оптимального управління багатодвигунним електроприводом стрічкового конвеєра.

Ключові слова: багатодвигунний асинхронний електропривод, частотне регулювання, моделювання, оптимальне керування, принцип максимуму.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В процессе разгона и торможения ленточного конвейера с многодвигательным электроприводом, особенно большой мощности, оптимальное управление является одной из необходимых задач синхронизации работы приводов, стабилизации натяжения ленты конвейера и уменьшения затрат электроэнергии за время перехода рабочего механизма из одного положения в другое.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В данной работе поставленная задача успешно решена методом принципа максимума Л.С. Понтрягина [1] при соответствующем математическом описании переходных процессов ленточного конвейера.

Уравнения движения многодвигательного конвейера, с учетом уравнений натяжения ленты конвейера, представлены в следующей виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_1}{dt} &= \frac{1}{\beta_1 T_{m1}} \Delta M_1 - \frac{1}{\beta_1 T_{m1}} \Delta M_{c1} + \\ &+ \frac{R_{\delta 1}}{\beta_1 T_{m1}} (\Delta F_2 - \Delta F_1); \\ \frac{d\Delta M_1}{dt} &= \frac{\beta_1}{T_{\gamma 1}} \Delta \omega_{01} - \frac{\beta_1}{T_{\gamma 1}} \Delta \omega_1 - \frac{1}{T_{\gamma 1}} \Delta M_1; \\ \frac{d\Delta\omega_{01}}{dt} &= \frac{k_{пч 1}}{T_{пч 1}} \Delta u_{PC1} - \frac{1}{T_{пч 1}} \Delta \omega_{01}; \\ \frac{d\Delta u_{PC1}}{dt} &= \frac{k_{PC1} k_{o.p.c1}}{\beta_2 T_{m2}} (\Delta M_2 - \Delta M_{c2}) - \\ &- \frac{k_{PC1} (k_{o.p.c1} + k_{o.p.c3} + k_{o.c1})}{\beta_1 T_{m1}} (\Delta M_1 - \Delta M_{c1}) + \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &+ \frac{k_{PC1} k_{o.p.c3}}{\beta_3 T_{m3}} (\Delta M_3 - \Delta M_{c3}) + \\ &+ \left(\frac{k_{PC1} k_{o.p.c1} R_{\delta 2}}{\beta_2 T_{m2}} - \frac{k_{PC1} k_{o.p.c3} R_{\delta 3}}{\beta_3 T_{m3}} \right) \Delta F_3 - \\ &- \left(\frac{k_{PC1} k_{o.p.c1} R_{\delta 2}}{\beta_2 T_{m2}} + \frac{k_{PC1} (k_{o.p.c1} + k_{o.p.c3} + k_{o.c1}) R_{\delta 1}}{\beta_1 T_{m1}} \right) \times \\ &\times \Delta F_2 + \left(\frac{k_{PC1} (k_{o.p.c1} + k_{o.p.c3} + k_{o.c1}) R_{\delta 1}}{\beta_1 T_{m1}} + \right. \\ &+ \left. \frac{k_{PC1} k_{o.p.c3} R_{\delta 3}}{\beta_3 T_{m3}} \right) \Delta F_1 - \frac{k_{o.p.c1} + k_{o.p.c3} + k_{o.c1}}{T_{PC1}} \Delta \omega_1 + \\ &+ \frac{k_{o.p.c1}}{T_{PC1}} \Delta \omega_2 + \frac{k_{o.p.c3}}{T_{PC1}} \Delta \omega_3 + \frac{\Delta u_3}{T_{PC1}}; \\ \frac{d\Delta F_2}{dt} &= \frac{c_2 R_{\delta 2}}{j_2} \Delta \omega_2 - \frac{c_2 R_{\delta 1}}{j_1} \Delta \omega_1 - \frac{R_{\delta 1} \omega_1^*}{j_1 l_2} \Delta F_2; \\ &+ \left(\frac{k_{PC3} (k_{o.p.c3} + k_{o.p.c2} + k_{o.c3}) R_{\delta 3}}{\beta_3 T_{m3}} + \frac{k_{PC3} k_{o.p.c2} R_{\delta 2}}{\beta_2 T_{m2}} \right) \times \\ &\times \Delta F_3 + \frac{k_{o.p.c3}}{T_{PC3}} \Delta \omega_1 + \frac{k_{o.p.c2}}{T_{PC3}} \Delta \omega_2 - \\ &- \frac{k_{o.p.c3} + k_{o.p.c2} + k_{o.c3}}{T_{PC3}} \Delta \omega_3 + \frac{\Delta u_3}{T_{PC3}}; \\ \frac{d\Delta F_1}{dt} &= \frac{c_1 R_{\delta 1}}{j_3} \Delta \omega_1 - \frac{c_1 R_{\delta 3}}{j_3} \Delta \omega_3 - \frac{R_{\delta 3} \omega_3^*}{j_3 l_1} \Delta F_1. \end{aligned} \right.$$

Для удобства решения запишем систему уравнений следующим образом:

$\Delta\omega_1 = x(1); M_{\omega_1} = x(2); \Delta\omega_{01} = x(3); \Delta u_{PC1} = x(4); \Delta F_2 = x(5);$
 $\Delta\omega_2 = x(6); M_{\omega_2} = x(7); \Delta\omega_{02} = x(8); \Delta u_{PC2} = x(9); \Delta F_3 = x(10);$ (2)
 $\Delta\omega_3 = x(11); M_{\omega_3} = x(12); \Delta\omega_{03} = x(13); \Delta u_{PC3} = x(14); \Delta F_1 = x(15).$

Одной из основных задач оптимального управления является выбор критерия качества процессов. Наиболее приемлемым критерием качества переходных процессов в нашем случае является интегральный критерий качества вида:

$$Q = \frac{1}{2} \int_0^T \left(\sum_{i=1}^6 x_i^2 + cu^2 \right) dt, \quad (3)$$

где c – весовой коэффициент управления.

Выбран интегральный критерий оптимальности, члены которого запрещают длительное существование отклонения x_i [2], что соответствует требованию технологического процесса конвейера.

Согласно методу принципа максимума функция H для системы запишется в виде:

$$H = \frac{1}{2} P_0 \left(\sum_{i=1}^{12} x_i^2 + cu^2 \right) + P_1 [k_1 x(2) + k_2 x(5) - k_2 x(15)] + P_2 [-k_{39} x(1) - k_4 x(2) + k_3 x(3)] + P_3 [-k_6 x(3) + k_5 x(4)] + P_4 [-k_{13} x(1) - k_8 x(2) - k_{11} x(5) + k_{14} x(6) + k_7 x(7) + k_{10} x(10) + k_{15} x(11) + k_9 x(12) + k_{12} x(15) + k_{16} \Delta u_3] + P_5 [-k_{18} x(1) - k_{19} x(5) + k_{17} x(6)] + P_6 [-k_{21} x(5) + k_{20} x(7) + k_{21} x(10)] + P_7 [-k_{61} x(6) - k_{23} x(7) + k_{22} x(8)] + P_8 [-k_{25} x(8) + k_{24} x(9)] + P_7 [-k_{61} x(6) - k_{23} x(7) + k_{22} x(8)] + P_8 [-k_{25} x(8) + k_{24} x(9)] + P_9 [k_{32} x(1) + k_{26} x(2) + k_{30} x(5) - k_{33} x(6) - k_{27} x(7) - k_{31} x(10) + k_{34} x(11) + k_{28} x(12) + k_{29} x(15) + k_{35} \Delta u_3] + P_{10} [-k_{37} x(6) - k_{38} x(10) + k_{36} x(11)] + P_{11} [-k_{40} x(10) + k_{39} x(12) + k_{40} x(15)] + P_{12} [-k_{63} x(11) - k_{42} x(12) + k_{41} x(13)] + P_{13} [-k_{44} x(13) + k_{43} x(14)] + P_{14} [k_{51} x(1) + k_{45} x(2) + k_{49} x(5) + k_{52} x(6) + k_{47} x(7) + k_{50} x(10) - k_{53} x(11) - k_{46} x(12) - k_{48} x(15) + k_{54} \Delta u_3] + P_{15} [k_{55} x(1) - k_{56} x(11) - k_{57} x(15)], \quad (4)$$

где P_i – координаты сопряженной системы, $P_0 = -1$.

Сопряженная система будет иметь вид, полагая при этом, что

$$\frac{dP_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad (5)$$

конечные значения P_i запишутся:

$$P_i(T) = 0, \quad (i = 1, 15). \quad (6)$$

Заданные начальные условия системы (1) для x_i будут иметь вид:

$$x_i(0) = x_i^0. \quad (7)$$

Управляющее воздействие u подбирается таким образом, чтобы в каждый момент времени функция H была максимальной. Для этого, приравняв производную $\partial H / \partial u$ нулю, находим оптимальное значение u :

$$u = \frac{1}{c} (k_{16} P_4 + k_{35} P_9 + k_{54} P_{14}). \quad (8)$$

Прежде чем рассматривать вопрос определения

управления u , рассчитаем начальные условия системы уравнений (4), матрица коэффициентов которой приведена ниже.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & k1 & 0 & 0 & k2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k2 \\ -k59 & -k4 & k3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k6 & k5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k13 & -k8 & 0 & 0 & -k11 & k14 & k7 & 0 & 0 & k10 & k15 & k9 & 0 & 0 & 0 & 0 & k12 \\ -k18 & 0 & 0 & 0 & -k19 & k17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k21 & 0 & k20 & 0 & 0 & k21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k61 & -k23 & k22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k25 & k24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k32 & k26 & 0 & 0 & k30 & -k33 & -k27 & 0 & 0 & -k31 & k34 & k28 & 0 & 0 & 0 & 0 & k29 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k37 & 0 & 0 & 0 & -k38 & k36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k40 & 0 & k39 & 0 & 0 & 0 & k40 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k63 & -k42 & k41 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k44 & k43 & 0 \\ k51 & k45 & 0 & 0 & k49 & k52 & k47 & 0 & 0 & 0 & k50 & -k53 & -k46 & 0 & 0 & 0 & -k48 \\ k55 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k56 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k57 \end{pmatrix}$$

Оптимальное управление u определяется алгоритмом метода последовательных приближений, блок-схема которого представлена на рис. 1.

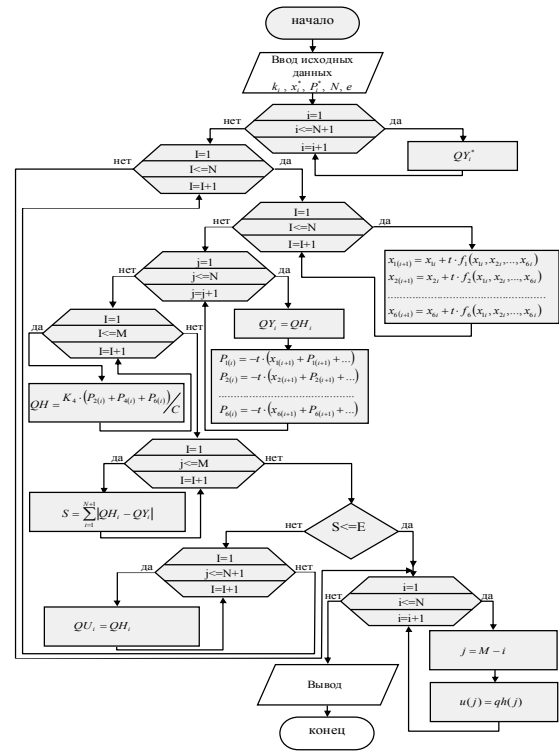


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета оптимального управления $u(t)$

По полученным значениям построена кривая управления, показанная на рис. 2.

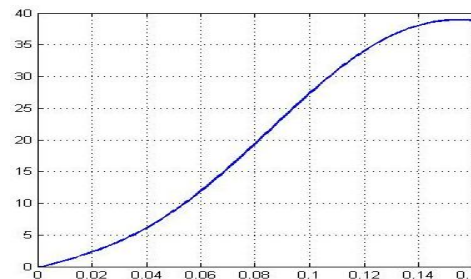


Рисунок 2 – Экспериментальная кривая управляющего сигнала

Оптимальная кривая сигнала управления, полученная на рис. 3, описывается уравнением второго порядка.

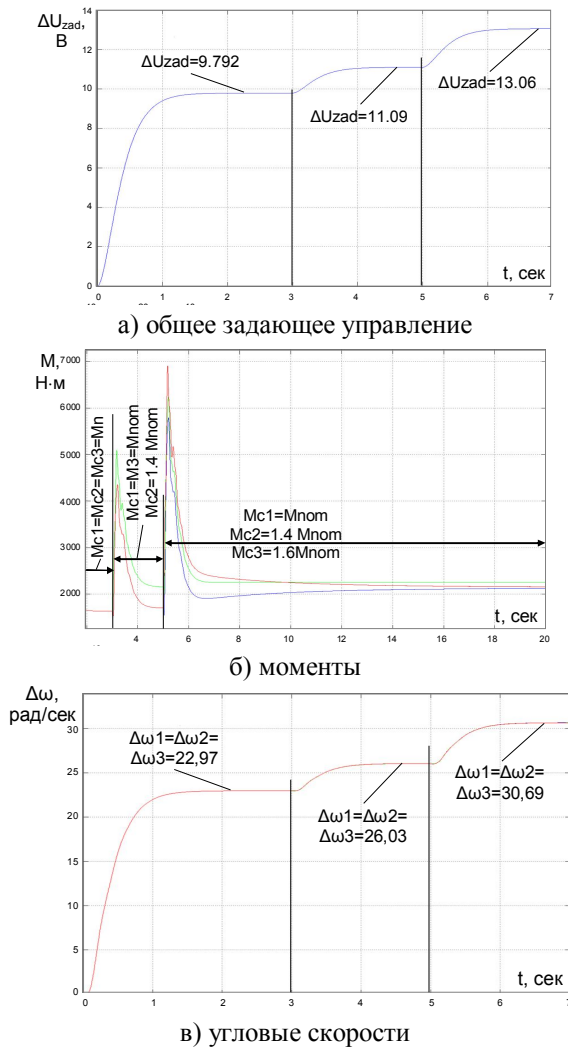


Рисунок 3 – Осциллограммы общего задающего управления, момента и угловых скоростей модели МАЭП ленточного конвейера с оптимальным управлением

Передаточная функция оптимальной кривой сигнала управления [3]:

$$\frac{u_{1,2,3}(p)}{u_s(p)} = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (9)$$

Полученная передаточная функция по оптимальной кривой сигнала управления определяет оптимальный закон управления многодвигательным асинхронным электроприводом синхронного вращения с преобразователями частоты ленточного конвейера.

Для исследования переходных процессов с сигналом управления u , согласно (9), составлена модель, осциллограммы задающего общего сигнала u , угловых скоростей $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$, моментов M_1, M_2, M_3 показаны на рис. 3.

ВЫВОДЫ. Результаты моделирования показывают, что сигнал управления, в зависимости от статических нагрузок двигателей, изменяется согласно рис. 3, в. Полученное уравнение управления улучшает качество регулирования. Данная модель позволяет осуществить плавный пуск, а также плавное регулирование скорости вращения МАЭП ПЧ ленточного конвейера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Профессия, 2004. – 752 с.
2. Олейников В.А., Зотов Н.С., Пришвин А.М. Основы оптимального и экстремального управления. – М.: Высшая школа, 1969. – 296 с.
3. Бекбаев А.Б., Сулеев Д.К., Скормин В.А., Ширяева О.И. Теория. – Алматы: Асем-Систем, 2008. – 552 с.

OPTIMUM CONTROL OF THE MULTIENGINED ELECTRIC DRIVE

A. Bekbaev, D. Akpanbetov, A. Zhumaev

Kazakh National Technical University named after K. Satpaev
ul. Satpaeva, 22, Almaty, 050013, Kazakhstan. E-mail: darhan_ba@mail.ru

In article questions of optimum control by the multiimpellent asynchronous electric drive with converters of frequency of the tape conveyor application of a method of a principle of a maximum are considered. For optimum control the integrated criterion of an optimality providing requirements of synchronous rotation of electric motors of the conveyor is chosen. The algorithm of optimum control is made, by application of a method of consecutive and is investigated in MATLAB 7.0 system, by results of calculation the optimum curve of management by which transfer function the law of optimum control is determined by the multiimpellent electric drive of the tape conveyor is received.

Key words: multiimpellent asynchronous electric drive, frequency regulation, modeling, optimum control, maximum principle.

REFERENCES

1. Besekersky V.A., Popov E.P. *Theory of automatic control systems.* – М.: Professiya, 2004. – 752 p. [in Russian]
2. Oleynikov V.A., Zotov N.S., Prishvin A.M. *Bases of optimum and extreme control.* – М.: Vysshaya shkola, 1969. – 296 p. [in Russian]
3. Bekbaev A.B, Suleev D.K., Skormin V.A., Shiryayeva O.I. *The theory.* – Almaty: Asem-System, 2008. – 552 p. [in Kazakh, Russian, English]

Стаття надійшла 18.06.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Нізімовим В.Б.