

УДК 62-83:681.5

В.П. Кочетков, Н.С. Курочкин, А.В. Коловский, Е.Я. Глушкин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОВОРОТА ЭКСКАВАТОРА С КОМБИНИРОВАННОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

**Кочетков Владимир Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика» Хакасского технического института – филиала ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Имеет статьи, монографии и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации автоматизированного электропривода, электропривода машин горнодобывающего комплекса. [e-mail: kochetkov-vp@yandex.ru].

**Курочкин Никита Сергеевич**, аспирант кафедры «Электроэнергетика» ХТИ – филиала СФУ, окончил СФУ. Имеет статьи и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации автоматизированного электропривода, электропривода машин горнодобывающего комплекса. [e-mail: nikita-kurochkin@yandex.ru].

**Коловский Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика» ХТИ – филиала СФУ. Имеет статьи в области разработки законов управления автоматизированного электропривода. [e-mail: Aleksey\_a\_v@list.ru].

**Глушкин Евгений Яковлевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика» ХТИ – филиала СФУ. Имеет статьи в области разработки законов управления автоматизированного электропривода. [e-mail: master8850@mail.ru].

### Аннотация

Повышение качества автоматизированного электропривода – один из наиболее эффективных и экономичных путей улучшения надежности и долговечности, уменьшения времени простоя в ремонте горных машин. В настоящее время парк экскаваторов в России, который насчитывает десятки тысяч машин, примерно на 80% изношен, что обуславливает необходимость проведения ремонтных работ, 30–40% от стоимости экскаватора составляет ремонт венцовой шестерни электропривода поворотного механизма. Оптимизация управления приводом поворота приводит к уменьшению динамической нагрузки венцовой шестерни. Уменьшение динамических нагрузок осуществляется за счет электрической части привода, что повышает надежность и долговечность системы. Поэтому создание систем автоматизированного управления электроприводом требует использования математических моделей. Рассмотрен электропривод поворотного механизма, имеющего наибольшее число отказов в механической и электрической частях экскаватора, с комбинированной оптимальной системой управления, представляющей внутренний контур питающего напряжения и аналитически конструируемый оптимальный регулятор по току якорной цепи, скорости двигателя, моменту упругому и скорости второй массы, расположенный в прямом канале системы управления. Для исследования электропривода создана имитационная модель в программе MATLAB пакете Simulink.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, комбинированная оптимальная система, аналитически конструируемый оптимальный регулятор.

## MODELING AND INVESTIGATING DYNAMICS OF THE ELECTRIC DRIVE OF EXCAVATING MACHINES SWING WITH THE USE OF THE COMBINED OPTIMAL CONTROL SYSTEM

**Vladimir Petrovich Kochetkov**, Doctor of Engineering; Professor at the Department of Electricity of Khakassia Technical Institute, a branch of Siberian Federal University; an author of articles, monographs, and inventions in the field of modeling, research and optimization of automated electric drive, the electric cars of the mining complex. e-mail: kochetkov-vp@yandex.ru.

**Nikita Sergeevich Kurochkin**, Postgraduate Student at the Department of Electricity of Khakassia Technical Institute, a branch of Siberian Federal University; graduated from Siberian Federal University; an author of articles and inventions in the field of modeling, research, and optimization of automated electric drive, the electric cars of the mining complex. e-mail: nikita-kurochkin@yandex.ru.

**Aleksei Vladimirovich Kolovskii**, Candidate of Engineering, Assistant Professor at the Department of Electricity of Khakassia Technical Institute, a branch of Siberian Federal University; an author of articles in the field of developing automated electric drive control laws. e-mail: Aleksey\_a\_v@list.ru.

**Evgenii Iakovlevich Glushkin**, Candidate of Engineering, Assistant Professor at the Department of Electricity of Khakassia Technical Institute, a branch of Siberian Federal University; an author of articles in the field of developing automated electric drive control laws. e-mail: master8850@mail.ru.

Abstract

Improving quality of the automated electric drive is one of the most efficient and cost-effective ways to improve reliability and durability and to reduce down time in repairing mining complexes. Currently in Russia, the excavator park has tens of thousands of machines, about 80% of them are exhausted that leads to the need of repairing works. The rotary mechanism electric drive ring gear repair cost is calculated to be 30–40% of the total excavator cost. Optimizing the rotation drive control reduces the dynamic load of a ring gear. Reducing the dynamic load is carried out with the electrical part of the drive that improves reliability and durability of the system. Therefore, the creation of automated electric drive control systems requires the use of mathematical models. The authors consider the rotary electric drive with the highest number of failures in mechanical and electrical parts of the excavator, with a combined optimal control system representing the voltage inner circuit and the optimal regulating device constructed analytically with the highest number of the anchor chain current, engine speed, elastic time, and speed of the second mass located in the forward channel of the control system. In order to investigate the drive, the simulation model was created in MATLAB program with the use of Simulink package.

Key words: automated electric drive, combined optimal control system, optimal regulating device constructed analytically.

**ВВЕДЕНИЕ**

Повысить эффективность производства открытых горных работ можно, совершенствуя силовую часть электро-механической системы управления технологическим процессом добычи, улучшением использования существующего оборудования при помощи автоматизации и оптимизации управления технологическими процессами экскавации.

Оптимизация управления приводом поворота приводит к уменьшению динамической нагрузки венцово-й шестерни. Уменьшение динамических нагрузок осуществляется за счет электрической части привода, что повышает надежность и долговечность системы. В общем случае задачей оптимизации динамики систем электропривода является получение экономичным способом переходных процессов в системе [1–2].

Комбинированные оптимальные системы управления (КОСУ) сочетают подчиненное регулирование внутренних и оптимальное регулирование внешних координат электропривода. Оптимальным называется управление, обеспечивающее достижение наилучших в смысле выбранного критерия качественных показателей системы

в условиях заданных ограничений на управляющие воздействия и переменные состояния. КОСУ можно составить из системы, представляющей одно-, двух- или трехконтурную систему последовательной коррекции больших и средних постоянных времени и системы, ограничивающей динамические нагрузки в механической части при помощи аналитически конструируемого оптимального регулятора (АКОР) [3–4].

В КОСУ мы можем изменять коэффициенты обратных связей (весовые коэффициенты критерия оптимальности), в отличие от систем подчиненного регулирования. Это свойство КОСУ позволяет нам найти наилучшее решение поставленной задачи, т. е. уменьшение бросков упругих моментов и времени переходного процесса [5].

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ**

КОСУ могут быть с коррекцией первой; первой и второй; первой, второй и третьей внутренних координат объекта управления. Внутренними координатами электропривода по системе тиристорный возбудитель – генератор – двигатель (ТВ – Г – Д), который широко приме-

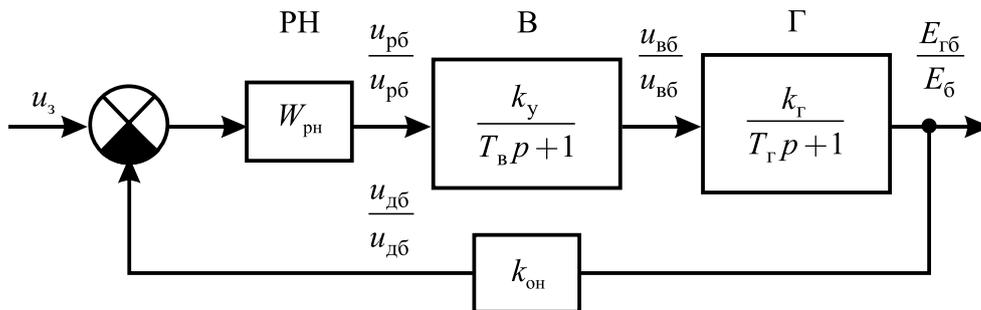


Рис. 1. Структурная схема контура питающего напряжения

няется для объектов горной промышленности, являются соответственно ток возбуждения генератора (питающее напряжение генератора), ток якорной цепи и скорость двигателя [6–7].

Рассмотрим математическое описание двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) с электроприводом типа ТВ – Г – Д с учетом только координат, а также при введении различных производных координат. Координатами ЭМС являются: токи возбуждения генератора и якорной цепи, скорости двигателя и второй массы и упругий момент. Введем контур питающего напряжения, структурная схема которого приведена на рисунке 1.

По методике расчета систем на «технический оптимум», приравнивая желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура питающего напряжения, определим передаточную функцию регулятора питающего напряжения [8]:

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} = W_{\text{рн}}(p)W_{\text{в}}(p)W_{\text{г}}(p)k_{\text{он}},$$

где  $W_{\text{рн}}(p)$ ,  $W_{\text{в}}(p)$ ,  $W_{\text{г}}(p)$  – передаточные функции соответственно регулятора питающего напряжения, возбуждения, генератора;

$p$  – комплексная переменная;

$k_{\text{он}}$  – коэффициент передачи датчика питающего напряжения;

$T_{\mu}$  – некомпенсируемая постоянная времени;

$k_{\text{г}}$ ,  $k_{\text{в}}$  – коэффициенты усиления тиристорного возбуждения и генератора.

Двухмассовую ЭМС представим в виде расчетной схемы (рис. 2).

Математическое описание ЭМС с коррекцией питающего напряжения может быть представлено в следующем виде при умножении и делении каждой переменной на базовую величину:

$$\begin{cases} \frac{di_a^*}{dt} = -\frac{1}{T_a}i_a^* - \frac{c\omega_{\delta}}{L_a I_{a\delta}}\omega_a^* + \frac{k_{\text{н}}u_{\text{y}\delta}}{L_a I_{a\delta}}u_{\text{y}}^*, \\ \frac{d\omega_1^*}{dt} = \frac{cI_{a\delta}}{J_1\omega_{\delta}}i_a^* - \frac{M_{\delta}}{J_1\omega_{\delta}}M_{\text{y}}^*, \\ \frac{dM_{\text{y}}^*}{dt} = \frac{c_{12}\omega_{\delta}}{M_{\delta}}(\omega_1^* - \omega_2^*) + \beta_{\text{вт}}\frac{\omega_{\delta}'}{M_{\delta}}(\omega_1'^* - \omega_2'^*), \\ \frac{d\omega_2^*}{dt} = \frac{M_{\delta}}{J_2\omega_{\delta}}M_{\text{y}}^*; \quad \beta_{\text{вт}}' = \frac{\beta_{\text{вт}}\omega_{\delta}'}{M_{\delta}}. \end{cases} \quad (1)$$

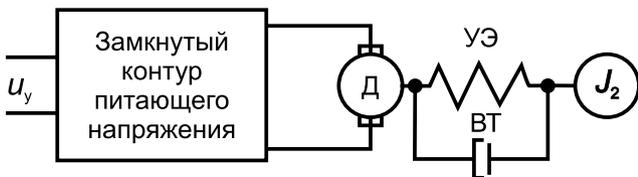


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой ЭМС

где  $i_a^*$ ,  $\omega_1^*$ ,  $\omega_2^*$ ,  $M_{\text{y}}^*$  – координаты в относительных единицах,

$T_a$  – постоянная времени двигателя,

$c$  – постоянная машины,

$\omega_{\delta}$  – базовая скорость,

$L_a$  – индуктивность якорной цепи,

$J_1$  – первая масса,

$I_{a\delta}$  – базовый ток якоря,

$k_{\text{н}}$  – коэффициент обратный передачи датчика питающего напряжения,

$u_{\text{y}\delta}$  – базовое напряжение управления,

$M_{\delta}$  – базовый момент,

$c_{12}$  – приведенная жесткость,

$\beta_{\text{вт}}$  – вязкое трение,

$J_2$  – вторая масса.

Обозначим  $i_a^* = x_1$ ,  $\omega_1^* = x_2$ ,  $\omega_2^* = x_3$ ,  $M_{\text{y}}^* = x_4$ .

В относительных единицах в формализованном виде электромеханическую систему представим уравнениями (2):

$$\begin{cases} x_1' = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u, \\ x_2' = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ x_3' = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ x_4' = a_{43}x_3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a_{ij}$ ,  $b_k$  – коэффициенты при координатах, выраженные в реальном масштабе времени, в отличие от рассмотренных ранее;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  – соответственно ток якорной цепи, скорость двигателя, упругий момент и скорость второй массы в относительных единицах;  $u$  – управляющее воздействие [9–10].

При наличии полной информации о координатах двухмассовой ЭМС с коррекцией питающего напряжения математическое описание системы имеет вид (2).

Критерий оптимальности рассматриваем в виде минимизации функционала:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + u^2) dt. \quad (3)$$

Составляем функцию Гамильтона:

$$H = -\frac{1}{2} \left( (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + u^2) + \Psi_1(-a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_k u) + \Psi_2(a_{21}x_1 - a_{23}x_3) + \Psi_3(a_{31}x_1 + a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4) + \Psi_4 a_{43}x_3 \right).$$

Приравняв к нулю производную функции Гамильтона по управлению, получим:

$$u_0 = b_k u. \quad (4)$$

По методике принципа максимума Л.С. Понтрягина система сопряженных уравнений:

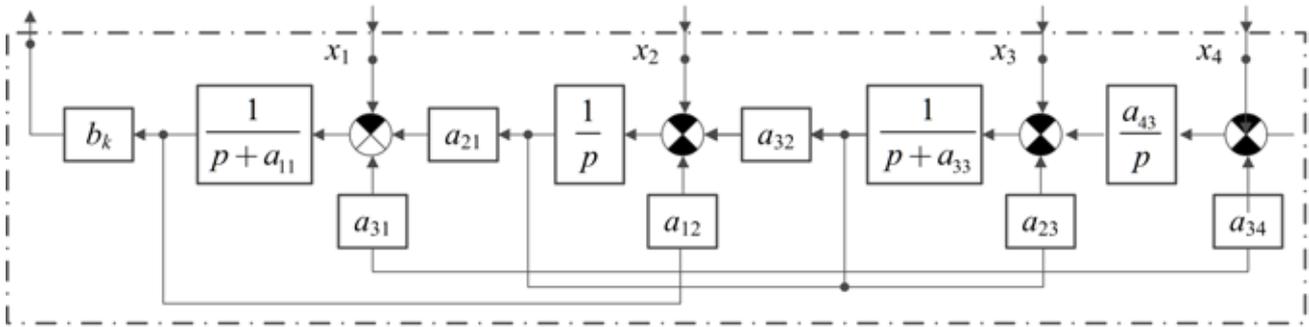


Рис. 3. Структурная схема АКОР по  $i_a, \omega_1, M_y, \omega_2$

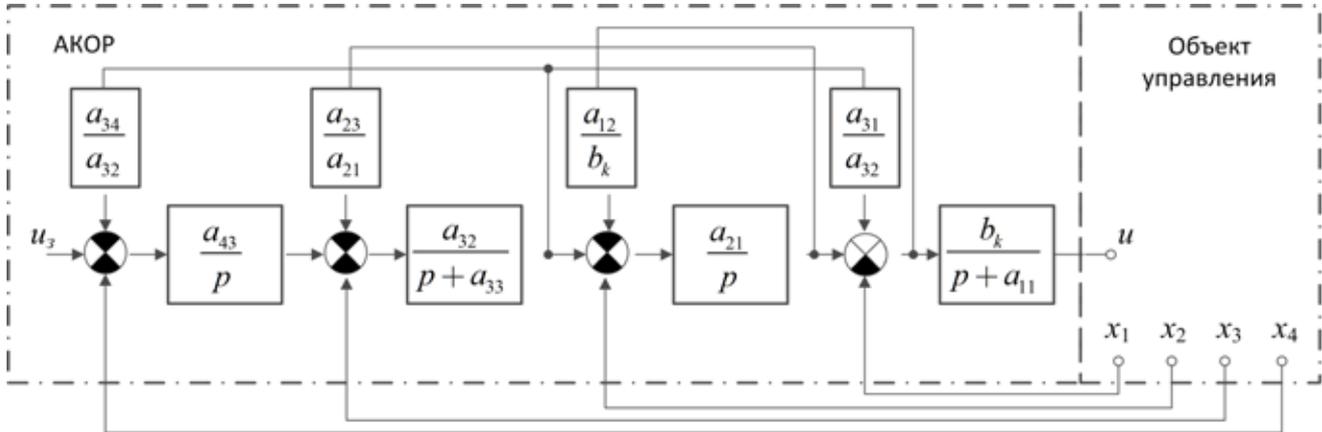


Рис. 4. Структурная схема электропривода с КОСУ по  $i_a, \omega_1, M_y, \omega_2$

$$\begin{cases} \Psi'_1 = -a_{11}\Psi_1 + a_{21}\Psi_2 + a_{31}\Psi_3 - x_1, \\ \Psi'_2 = -a_{12}\Psi_1 + a_{32}\Psi_3 - x_2, \\ \Psi'_3 = -a_{23}\Psi_2 - a_{33}\Psi_3 + a_{43}\Psi_4 - x_3, \\ \Psi''_4 = -a_{34}\Psi_3 - x_4. \end{cases} \quad (5)$$

В соответствии с (4) и (5) составлена структурная схема АКОР по току якорной цепи, скорости двигателя, упругому моменту и скорости второй массы (рис. 3).

Структурная схема электропривода с КОСУ при наличии полной информации о координатах двухмассовой ЭМС с АКОР в прямом канале регулирования приведена на рисунке 4.

Как следует из рисунка 4, комбинированная система управления электроприводом представляет с учетом кон-

тура питающего напряжения пятиконтурную систему подчиненного регулирования с интегральными регуляторами скорости и апериодическими регуляторами тока и упругого момента. Кроме того, имеются внутренние обратные связи между регуляторами [11–12].

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С КОРРЕКЦИЕЙ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Объект управления имеет вид, представленный на рисунке 5.

На основании структурной схемы электропривода (рис. 5) составлена схема модели электропривода с КОСУ с коррекцией питающего напряжения и оптимальным регулированием по  $i_a, \omega_1, M_y, \omega_2$ . (рис. 6)

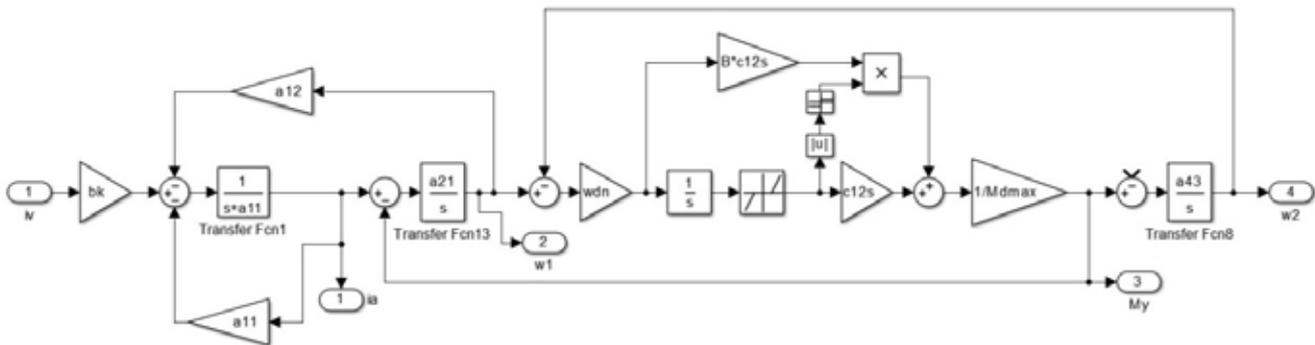


Рис. 5. Объект управления электропривода с КОСУ

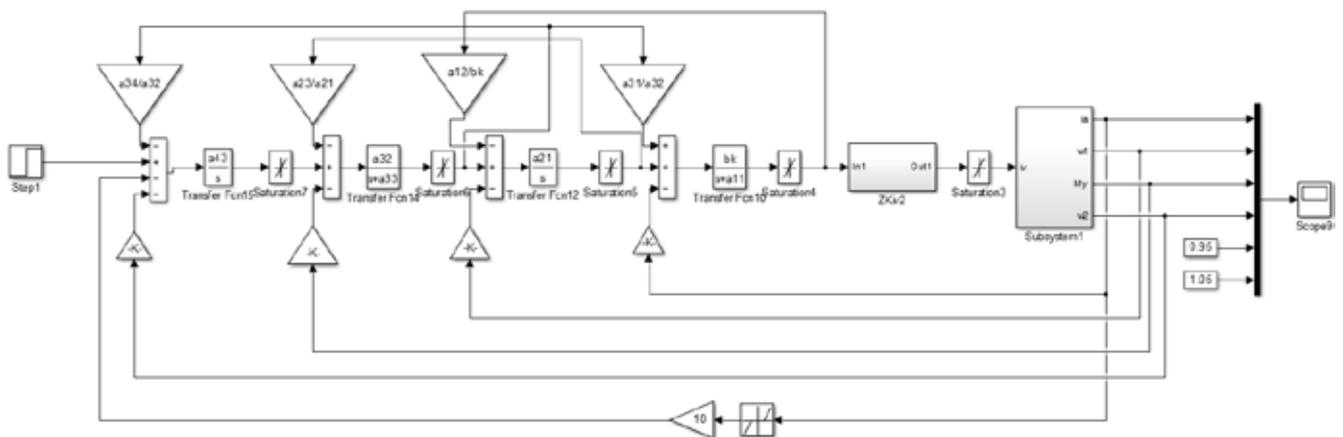


Рис. 6. Схема модели электропривода с КОСУ с коррекцией питающего напряжения и оптимальным регулированием по  $i_a$ ,  $\omega_1$ ,  $M_y$ ,  $\omega_2$

В таблице 1 и таблице 2 приведены результаты моделирования электропривода с КОСУ с коррекцией питающего напряжения и оптимальным регулированием по  $i_a$  и  $\omega_1$ ,  $M_y$  и  $\omega_2$  при различных весовых коэффициентах критерия оптимальности. На рисунке 7 показана осциллограмма переходных процессов электропривода с наименьшим временем переходного процесса  $t_{nn}$ .

Таблица 1

Зависимость бросков момента и времени переходного процесса

$K_{ia}$	$M_{max}$	$t_{nn}$	$K_{\omega 1}$	$M_{max}$	$t_{nn}$
0	2,91	6,02	0	2,92	6,14
0,1	2,52	6,05	2	2,87	5,84
0,2	2,18	6,38	4	2,85	5,65
0,3	1,96	6,78	6	2,8	5,55
0,4	1,82	7,2	8	2,82	5,55
0,5	1,72	7,57	10	2,85	5,55

Таблица 2

Зависимость бросков момента упругого и времени переходного процесса

$k_{My}$	$M_{max}$	$t_{nn}$	$k_{\omega 2}$	$M_{max}$	$t_{nn}$
			1,2	2,91	6,33
0,2	2,93	6,56	1	2,905	6,3
0,1	2,93	6,25	0,8	2,9	6,22
0	2,91	6,14	0,6	2,9	6,2
1	2,8	6	0,4	2,9	6,18
2	2,79	5,75	0,2	2,905	6,16
4	2,79	5,65	0	2,9055	6,14
6	2,81	5,55	0,5	2,91	5,71
8	2,91	5,55	5	2,91	5,55
10	2,92	5,55	10	2,91	5,55

Как видно из графиков (рис. 8), при увеличении весового коэффициента по току якоря, уменьшаются максимальные броски момента упругого, однако увеличивается время переходного процесса, что является негативной характеристикой для электропривода.

При увеличении весового коэффициента по скорости двигателя, максимальные броски момента упругого остаются почти неизменными, при уменьшении времени переходного процесса, что является положительной динамикой для электропривода.

Увеличение весового коэффициента по моменту упругому приводит к практически неизменному максимальному броску момента упругого на всем промежутке значений, при уменьшении времени переходного процесса, что является положительной динамикой для электропривода (рис. 9). Увеличение весового коэффициента по скорости второй массы приводит к практически неизменному максимальному броску момента упругого на всем промежутке значений, при уменьшении времени переходного процесса, что является положительной динамикой для электропривода.

В таблице 3 показана зависимость максимальных бросков момента упругого ( $M_{max}$ ) и времени переходного процесса ( $t_{nn}$ ) от весовых коэффициентов по току якоря ( $K_{ia}$ ) и скорости двигателя ( $K_{\omega 1}$ )

При разных вариациях весовых коэффициентов по току двигателя и скорости первой массы наблюдается аналогичная тенденция: уменьшение времени переходного процесса и малое увеличение максимального значения броска момента упругого при увеличении значения весового коэффициента по скорости двигателя, уменьшение бросков максимального значения момента упругого и увеличение времени переходного процесса при увеличении весового коэффициента по току двигателя, а также практически неизменное значение максимального броска момента упругого на всем промежутке изменений весового коэффициента по упругому моменту и скорости второй массы при незначительном уменьшении времени переходного процесса.

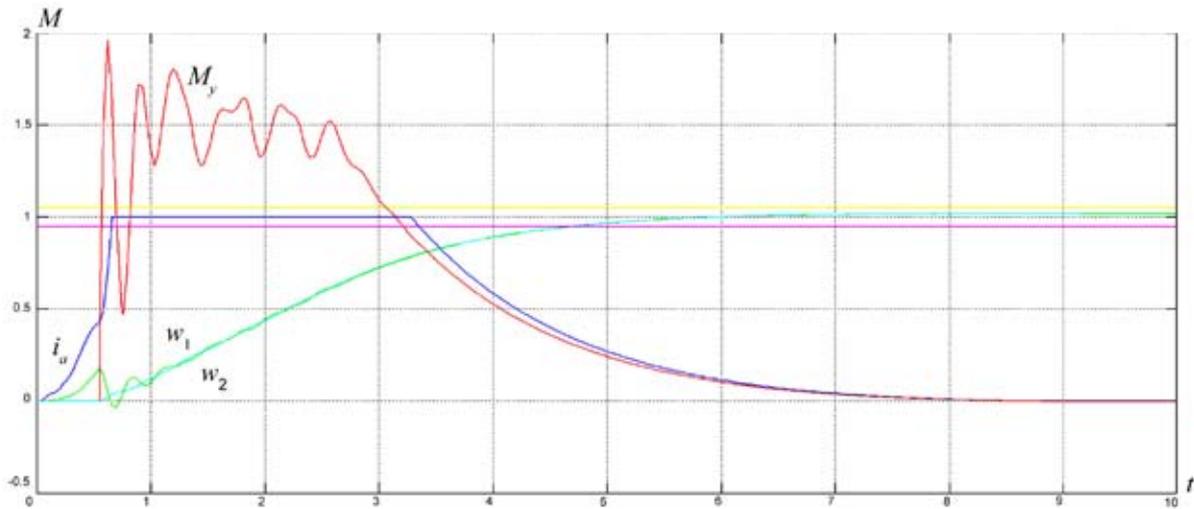


Рис. 7. Оциллограмма переходного процесса КОСУ в относительных единицах с наименьшим временем переходного процесса  $t_{nn}$

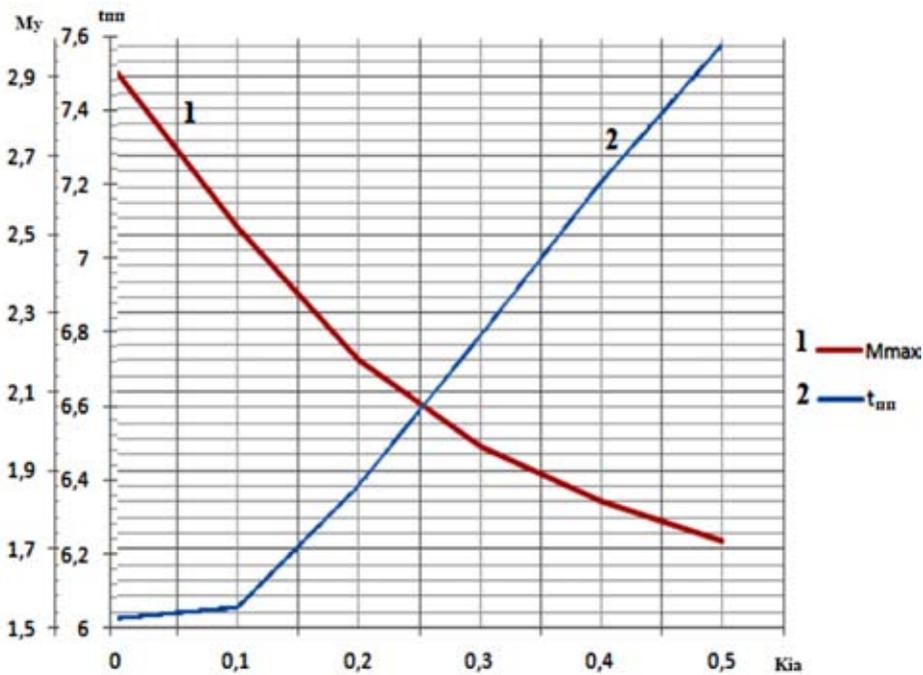


Рис. 8. График зависимости бросков момента упругого ( $M_{max}$ ) и времени переходного процесса ( $t_{nn}$ ) от весового коэффициента по току якоря ( $K_{ia}$ )

Таблица 3

$K_{ia}$	0,1		0,2		0,3		0,4		0,5	
$K_{\omega 1}$	$M_{max}$	$t_{nn}$								
0	2,52	6,04	2,18	6,38	1,96	6,78	1,82	7,20	1,72	7,57
0,5	2,56	6,06	2,19	6,41	1,96	6,80	1,80	7,19	1,71	7,52
1	2,48	5,99	2,00	6,40	1,96	6,61	1,80	6,90	1,69	7,29
1,5	2,77	5,96	2,26	6,26	2,09	6,49	1,92	6,67	1,8	6,97
2	2,74	5,98	2,34	6,17	2,23	6,33	2,08	6,52	2,02	6,72
4	2,87	5,55	2,86	5,57	2,60	5,62	2,35	5,67	2,45	5,84
6	2,90	5,55	2,70	5,55	2,63	5,58	2,50	5,62	2,64	5,78
8	2,85	5,55	2,81	5,55	2,88	5,56	2,62	5,59	2,55	5,75
10	2,81	5,55	2,91	5,55	2,76	5,56	2,70	5,57	2,61	5,72

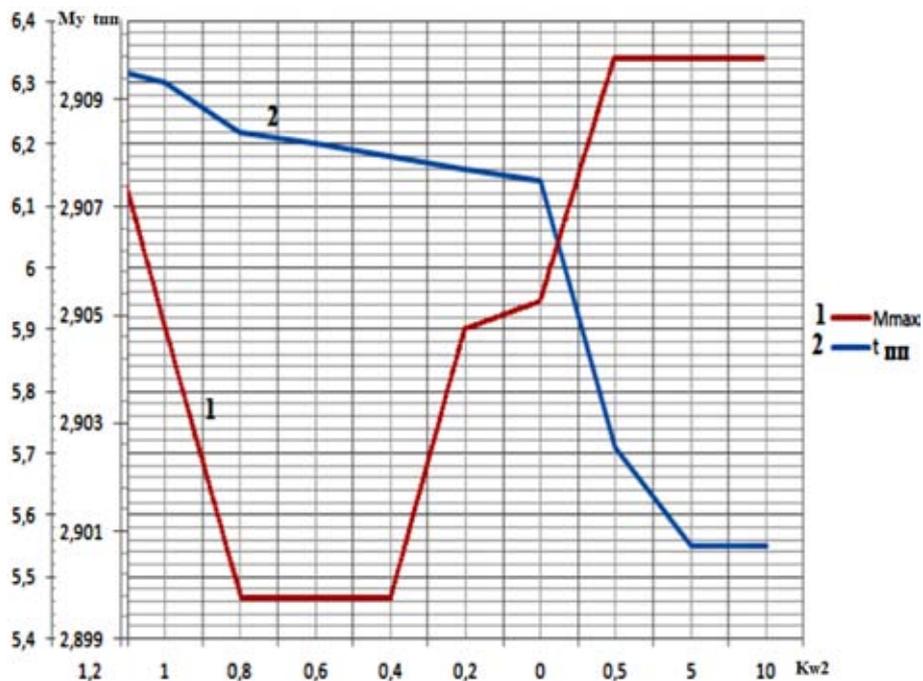


Рис. 9. График зависимости времени переходного процесса ( $t_{np}$ ) и максимальных бросков момента упругого ( $M_{max}$ ) от весового коэффициента по скорости второй массы ( $K_{\omega 2}$ )

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результат исследования показал преимущество КОСУ электроприводом поворота экскаватора перед классическими системами подчиненного регулирования. Возможность настройки системы за счет выбора весовых коэффициентов критерия оптимальности позволяет отрегулировать требуемые характеристики электропривода: момента упругого ( $M_{max}$ ) и времени переходного процесса ( $t_{np}$ ). В КОСУ в частном случае решен вопрос определения весовых коэффициентов критериев оптимальности, а в общем случае задача нахождения весовых коэффициентов не решена. За счет применения КОСУ удалось значительно уменьшить максимальное значение бросков упругого момента ( $M_{max}$ ) и при этом уменьшить время переходного процесса ( $t_{np}$ ). Оптимизация управления приводом поворота приводит к уменьшению динамической нагрузки венцовой шестерни. Уменьшение динамических нагрузок осуществляется за счет электрической части привода, что повышает надежность и долговечность системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетков В.П. Основы теории управления. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. – 411 с.
2. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
3. Кочетков В.П., Подборский П.Э., Коловский А.В. Оптимизация динамики электромеханической системы с помощью систем с переменной структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 10 (103). – С. 42–47.
4. Kochetkov V.P. Interconnected control system of the excavator electric drive // Seventh international conference on electrical machines and drives. – Varna Bulgaria: Ltd – SOFIA, 1993. – pp. 378–386.
5. Kochetkov V. P., Ageev S. L., Vaschenko G. V. Optimal control of shovel electric drive // Seventh international conference on electrical machines and drives. – Varna Bulgaria: Ltd – SOFIA, 1993. – pp. 386–394.
6. Kochetkov V.P., Kochetkov V. M. Electric drive of swing mechanism with non-traditional control system // Seventh international conference on electrical machines and drives. – Varna Bulgaria: Ltd – SOFIA, 1993. – pp. 394–402.
7. Волков Д.П., Каминская Д.А. Динамика электромеханических систем экскаваторов. – М.: Машиностроение, 1971. – 384 с.
8. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах управления и автоматизации. – М.: Наука, 1981. – 368 с.
9. Квакернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
10. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 787 с.
11. Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1972. – 120 с.
12. Кочетков В.П., Курочкин Н.С. Исследование ограничения динамических нагрузок многодвигательного электропривода с комбинированной оптимальной системой управления // Энергетика и энергосбережение:

теория и практика : матер. I Всерос. науч.-практ. конф., 3–5 дек. 2014, Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун – т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В. П. Тациенко (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово, 2014.

## REFERENCES

1. Kochetkov V.P. *Osnovy teorii upravleniia* [Control Theory Fundamentals]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2012. 411 p.
2. Kliuchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda* [Limitation of Dynamic Electric Loads]. Moscow, Energiia Publ., 1973. 320 p.
3. Kochetkov V.P., Podborskii P.E., Kolovskii A.V. Optimizatsiia dinamiki elektromekhanicheskoi sistemy s pomoshchiu system s peremennoi strukturoi [Optimizing of Dynamics for an Electromechanical System by the Application of Variable Structure Systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie* [Mechatronics, Automation, and Control], 2009, no. 10 (103), pp. 42–47.
4. Kochetkov V.P. Interconnected Control System of the Excavator Electric Drive. *The Seventh Int. Conf. on Electrical Machines and Drives*. Varna Bulgaria, Ltd SOFIA Publ., 1993, pp. 378–386.
5. Kochetkov V. P., Ageev S. L., Vaschenko G. V. Optimal Control of Shovel Electric Drive. *The Seventh Int. Conf. on Electrical Machines and Drives*. Varna Bulgaria, Ltd SOFIA Publ., 1993, pp. 386–394.
6. Kochetkov V.P., Kochetkov V. M. Electric Drive of Swing Mechanism with Non-traditional Control System. *The Seventh Int. Conf. on Electrical Machines and Drives*. Varna Bulgaria, Ltd SOFIA Publ., 1993, pp. 394–402.
7. Volkov D.P., Kaminskaia D.A. *Dinamika elektromekhanicheskikh sistem ekskavatorov* [Dynamics of Excavators Electric Drivers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 384 p.
8. Utkin V.I. *Skolziashchie rezhimy v zadachakh upravleniia i avtomatizatsii* [Sliding Modes in Control and Automation Tasks]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 368 p.
9. Kwakernaak H., Sivan R. *Lineinye optimalnye sistemy upravleniia* [Linear Optimal Control Systems]. Moscow, Mir Publ., 1977. 650 p.
10. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia*. Uchebnik v 5 t. 2-e izd., pererab. i dop. T. 5 Metody sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia. Pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova [Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory. Textbook in 5 volumes. 2nd Edition, updated and revised. Vol. 5. Methods of Modern Automatic Control Theory]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 787 p.
11. Rudakov V.V., Martikaynen R.P. *Sintez elektroprivodov s posledovatelnoi korrektsiei* [Synthesis of Electric Drives with Sequential Correction]. Leningrad, Energiia Publ., 1972. 120 p.
12. Kochetkov V.P., Kurochkin N.S. Issledovanie ogranicheniia dinamicheskikh nagruzok mnogodvigatel'nogo elektroprivoda s kombinirovannoi optimalnoi sistemoi upravleniia [Research for Dynamic Load Limitation of the Multimotor Drive with a Combined Optimal Control System]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Energetika i energoberezhenie. Teoriia i praktika* [The Theory and Practice of Power Engineering and Energy Efficiency. Proc. All-Russian Sci. Conf.]. Kemerovo, 2014. (In Russ.)