

На правах рукописи

Коловский Алексей Владимирович

Синтез систем управления автоматизированным экскаваторным электроприводом с использованием скользящих режимов.

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы  
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2012

Работа выполнена в Хакасском техническом институте – филиале ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,  
Кочетков Владимир Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
Ещин Евгений Константинович

Кандидат технических наук, доцент,  
Филипас Александр Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк)

Защита диссертации состоится "02" марта 2012 г. в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национально исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национально исследовательский Томский политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_» января 2012

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
к.т.н., доцент

Ю.Н.Дементьев

## Общая характеристика работы.

**Актуальность темы.** В настоящее время в России существует большой парк экскаваторов, среди которого карьерные экскаваторы функционируют в наиболее трудных условиях при разработке скальных пород и мерзлых грунтов.

Электропривод механизма копания карьерного экскаватора представляет собой сложную многомассовую систему и, следовательно, на его динамику большое влияние оказывают зазоры в передачах и действие упругих элементов. Также жесткость упругой связи и момент инерции исполнительного органа меняются в процессе технологического цикла и зависят от геометрического положения исполнительного органа в пространстве.

Обеспечение требуемого качества управления технологическим процессом экскавации целиком возлагается на систему управления.

Одним из перспективных подходов к синтезу систем управления сложными динамическими объектами является применение систем с переменной структурой (СПС). Наиболее широкое признание и применение в этой теории получило направление, изучающее скользящие режимы. В этих режимах движение изображающей точки определяется уравнением поверхности переключения и не зависит от свойств объекта управления. То есть система, находящаяся в скользящем режиме, инвариантна к параметрическим и внешним возмущениям.

**Цель работы:** синтез и исследование систем управления с переменной структурой для электроприводов копающих механизмов экскаваторов, позволяющих повысить показатели качества динамических процессов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются **следующие задачи:**

– синтез комбинированной системы управления с переменной структурой электроприводом копающих механизмов экскаваторов посредством последовательной коррекции внутренних координат электропривода и СПС внешних координат;

– оптимизация динамики экскаваторного электропривода с помощью организации скользящего режима, минимизирующего квадратичный критерий оптимальности;

– определение влияния весовых коэффициентов критерия оптимальности на динамику ЭМС;

– синтез системы управления с переменной структурой экскаваторным электроприводом с явной эталонной моделью и определение ее параметров;

– проверка эффективности разработанных систем разрывного управления экскаваторным электроприводом при помощи структурного моделирования.

**Методы исследований:** дифференциального и интегрального исчисления, пространства состояния, для описания и анализа динамики ЭМС; модального управления и АКОР для синтеза поверхности переключения; теории систем с переменной структурой и функции Ляпунова для синтеза законов управления. Расчеты и компьютерное моделирование проводились с использованием программного пакета MATLAB для подъемного механизма экскаватора ЭКГ-8И.

### **Научная новизна и научные результаты, выносимые на защиту:**

– способ синтеза комбинированных систем управления с переменной структурой, заключающийся в последовательной коррекции внутренних координат (тока возбуждения или тока якорной цепи) и использованием теории систем с переменной структурой для регулирования внешними координатами электропривода;

– впервые для управления экскаваторным электроприводом применена система с переменной структурой, поверхность переключения которой выбрана таким образом, что движению по ней соответствует минимум квадратичного функционала;

– на основании анализа влияния весовых коэффициентов критерия оптимальности на динамику электропривода предложен способ выбора коэффициентов критерия оптимальности, заключающийся в разделении координат на группы с последующим выбором весовых коэффициентов для каждой группы с учетом максимально допустимого отношения весовых коэффициентов при каждой группе;

– экскаваторный электропривод с системой управления с переменной структурой с явной эталонной моделью и способ выбора ее параметров заключающийся в синтезе замкнутой следящей оптимальной системы при средних параметрах объекта управления, математическое описание которой и является эталонной моделью.

**Достоверность полученных результатов работы** определяется обоснованностью принятых допущений, удовлетворительным совпадением результатов модельного и физического экспериментов.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в том, что используемые законы управления позволяют повысить качество отработки задающих воздействий электромеханическими системами в динамических режимах и снизить величину упругого момента в режиме жесткого стопорения.

**Использование результатов диссертации.** Материалы диссертационной работы, касающиеся моделирования и синтеза систем управления с переменной структурой электроприводами, использованы на предприятиях разрез «Нерюнгринский» филиал ОАО ХК «Якутуголь» и ООО «СУЭК-ХАКАССИЯ» разрез «Черногорский», а также в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных проектов студентами кафедры «Электроэнергетика» Хакасского технического института – филиала ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

**Апробация работы.** Научные результаты и положения диссертационной работы непосредственно докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. (г. Санкт – Петербург, 2007 г.), IV МНПК «Электронные средства и системы управления опыт инновационного развития» (г. Томск, 2007 г.), XIV, XV МНПК студентов, аспирантов, и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2008, 2009 г.г.), XVII МНПК «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (СИБРЕСУРС-17-2011) (г. Томск, 2011 г.), III, IV ВНПК «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях»

(г. Новокузнецк, 2006, 2010 г.г.), VI ВНК «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2007 г.), ВНК студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (г. Красноярск, 2008 г.), ВНК «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (г. Омск, 2008 г.), ВНК «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2008 г.), 6-й Региональной НПК «Интеллектуальные ресурсы ХТИ – филиала СФУ – Хакасии 2007 (наука, техника, образование)» (г. Абакан, 2007 г.), I, II Межрегиональных научно-практических конференциях «Инновационное развитие, модернизация и реконструкция объектов ЖКХ в современных условиях» (г. Абакан, 2010, 2011 г.г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 27 работах (основные приведены в списке публикаций). Из них 3 статьи в изданиях по перечню ВАК, 1 учебное пособие, 2 патента РФ, 2 статьи в научных журналах не входящих в перечень ВАК, 15 статей в сборниках докладов Международных и Всероссийских конференций, 4 статьи в сборниках докладов Межрегиональных и Региональных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа представлена на 173 страницах, включающей 149 страниц основного текста, содержит 87 рисунков, 6 таблиц и 6 приложений на 8 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 132 наименований на 16 страницах. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

#### **Содержание работы.**

**В первом разделе** рассмотрен экскаватор и электропривод экскаватора как объект управления, проанализированы известные принципы построения систем управления экскаваторного электропривода. Выявлены особенности и недостатки таких систем, поставлена задача дальнейшего исследования.

В России для экскаваторов средней мощности серийно применяют систему генератор-двигатель (Г-Д), а для экскаваторов ЭКГ-20 систему тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д). Несмотря на явное преимущество системы ТП-Д и ПЧ-АД перед системой Г-Д, особенно для привода экскаваторов средней мощности, серийно продолжает выпускаться система Г-Д, т.к. идеально подходит для слабых карьерных сетей и наиболее удобен для обслуживания.

На экскаваторных электроприводах наибольшее распространение получили системы подчиненного регулирования. Несомненным достоинством таких систем является простота настройки и реализации, как в аналоговом, так и в цифровом виде. Недостатком используемых СПР является синтез только двух или трех контуров регулирования, что вынуждает рассматривать объект управления как одномассовый.

В копающих механизмах жесткость упругой связи и момент инерции исполнительного органа меняется в процессе экскавации и зависит от геометрического положения ковша в пространстве и заполнения ковша породой. В этих условиях не всегда удается с помощью систем подчиненного

регулирования обеспечить качественное регулирование координат ЭМС в динамических режимах.

Результаты моделирования показали, что системы подчиненного регулирования нуждаются в дополнительных корректирующих связях для снятия динамической ошибки по току якоря. В режиме жесткого стопорения классические СПР не способны ограничить величину упругого момента.

**Во втором разделе** рассмотрен синтез систем с переменной структурой для электропривода копающего механизма, когда состояние управляемого процесса полностью определяется ошибкой выходной координаты (скорости двигателя) и ее производными.

Алгоритмические схемы систем управления автоматизированными электроприводами подъемного механизма экскаватора, выполненными по системе Г-Д и управляемый преобразователь – двигатель (УП-Д) изображены на рисунках 1 и 2 соответственно.

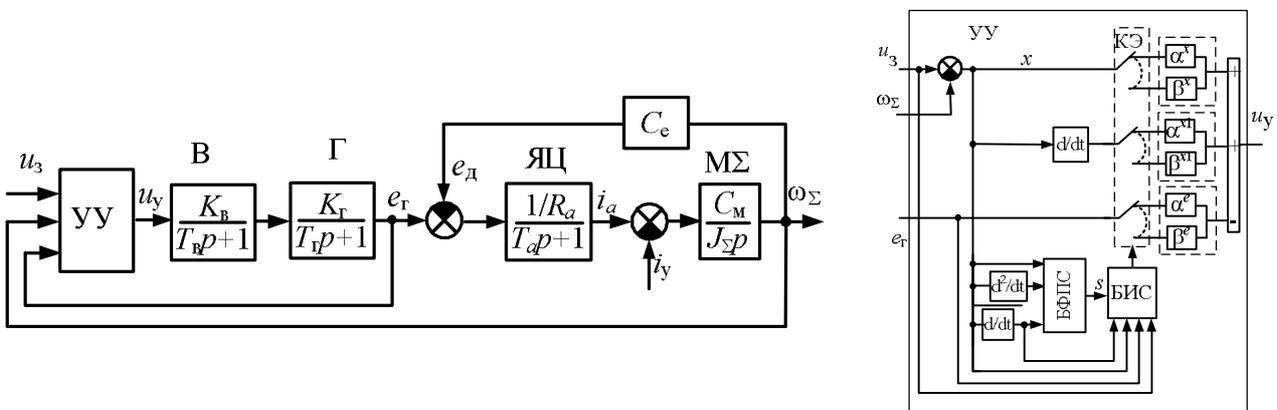


Рис. 1. Алгоритмическая схема системы управления автоматизированным экскаваторным электроприводом, выполненным по системе Г-Д.

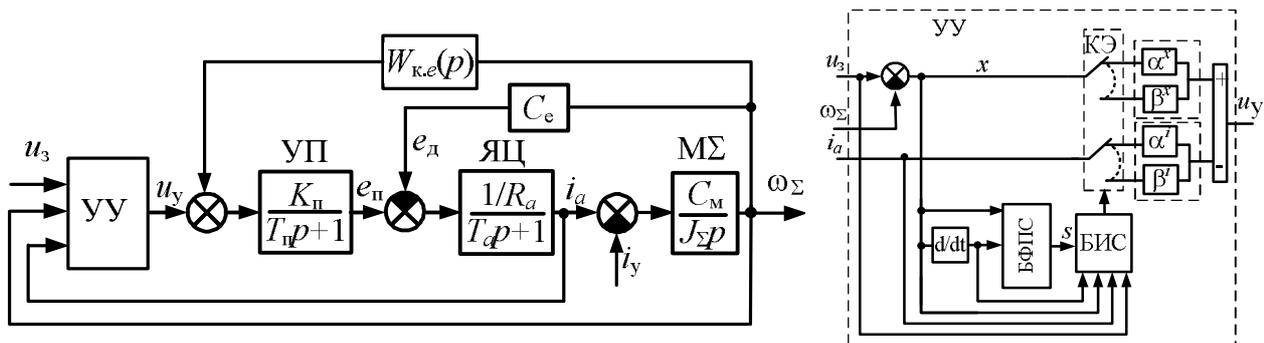


Рис. 2. Алгоритмическая схема системы управления автоматизированным экскаваторным электроприводом, выполненным по системе УП-Д.

Так как для системы УП-Д действие ЭДС двигателя не учитывается при синтезе на вход преобразователя введена соответствующая положительная обратная связь с передаточной функцией

$$W_{к.е}(p) = \frac{C_e}{W_{у.п.}(p)} = \frac{C_e (T_\Pi p + 1)}{K_\Pi}$$

Для компенсации действия внешних возмущений (действие ЭДС двигателя и упругого момента для системы Г-Д и действие упругого момента для системы УП-Д) введена коммутируемая обратная связь по ЭДС (току возбуждения) генератора в системе Г-Д и току якорной цепи в системе УП-Д.

Уравнение поверхности переключения:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i x_i,$$

где  $n=3$  для системы Г-Д и  $n=2$ , для системы УП-Д,  $c_n=1$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – соответственно ошибка регулирования по скорости и ее первая и вторая производные.

Для организации в системе режима скольжения выбрано кусочно-линейное управление вида  $u = \Psi_2^x \dot{x} + \Psi_1^x x - \Psi^e e_r$  для системы Г-Д, и  $u = \Psi^x x - \Psi^i i_a$  для системы ТП-Д, где  $\Psi$  – функции переключения вида

$$\Psi_2^x = \begin{cases} \alpha_2 & \text{при } x_2 s > 0 \\ \beta_2 & \text{при } x_2 s < 0 \end{cases}; \Psi_1^x = \begin{cases} \alpha_1 & \text{при } x_1 s > 0 \\ \beta_1 & \text{при } x_1 s < 0 \end{cases}; \Psi^e + \frac{1}{K_r} = \begin{cases} \gamma_0 & \text{при } F s > 0 \\ \rho_0 & \text{при } F s < 0 \end{cases};$$

$$\Psi^x = \begin{cases} \alpha & \text{при } x_1 s > 0 \\ \beta & \text{при } x_1 s < 0 \end{cases}; \Psi^i = \begin{cases} \alpha^i & \text{при } (J_\Sigma \dot{x} + C_m i_a) s > 0 \\ \beta^i & \text{при } (J_\Sigma \dot{x} + C_m i_a) s < 0 \end{cases}.$$

Из условия устойчивости скользящего режима  $s(t)\dot{s}(t) < 0$  определены величины коэффициентов в функциях переключения.

Разработан способ синтеза систем управления, заключающийся в последовательной коррекции внутренних координат (тока возбуждения или тока якорной цепи) и использованием теории систем с переменной структурой для регулирования внешними координатами электропривода.

Осуществив последовательную коррекцию питающего напряжения частично приближаем систему генератор-двигатель по быстродействию к системе управляемый преобразователь – двигатель. При этом математическое описание объекта управления уменьшается на один порядок. По методике расчета на «технический оптимум» определим передаточную функцию регулятора питающего напряжения

$$W_{p.n.n}(p) = \frac{T_r p + 1}{T_n p},$$

где  $T_n = 2T_\mu K_\nu K_r k_{o.n} / R_\nu$ .

Пренебрегая постоянной времени замкнутого контура напряжения равной  $2T_\mu$ , дальнейший синтез системы управления ведем аналогично как для системы УП-Д.

Алгоритмическая схема комбинированной системы управления с переменной структурой автоматизированным электроприводом копающего механизма экскаватора изображена на рисунке 3.

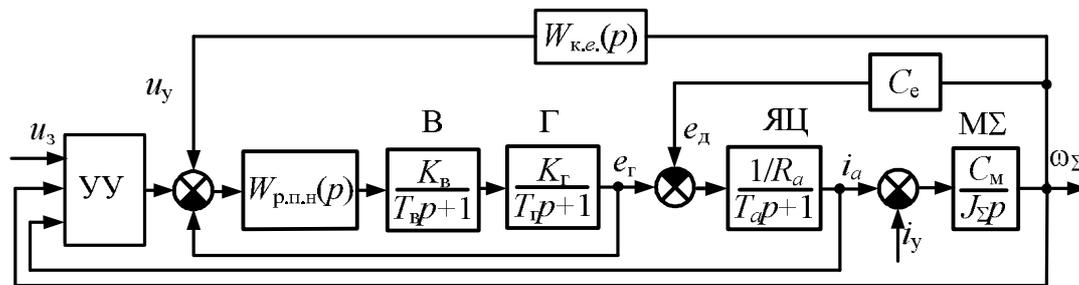


Рис. 3. Алгоритмическая схема комбинированной системы управления с переменной структурой автоматизированным экскаваторным электроприводом.

Результаты моделирования показали что:

1. Применение системы управления с переменной структурой и комбинированного управления с использованием последовательной коррекции внутренних координат позволяют получить ЭМС инвариантную к внешним возмущениям при надежном ограничении тока якорной цепи.

2. Жесткость первого участка электромеханической характеристики соответствует желаемой, зависит от формы задающего сигнала ( $u_3(i_a)$ ) и может гибко регулироваться практически до абсолютной.

3. В рассмотренных системах динамические характеристики в различных режимах (пуска, наброса нагрузки, стопорения) исследуемого электропривода максимально совпадают со статической, что говорит о высоком качестве системы управления.

4. С возрастанием числа замкнутых контуров возрастает влияние малых постоянных времени неучтенных при синтезе. Причем замкнутый контур тока якорной цепи уже нельзя представлять безынерционным звеном.

**Третий раздел** посвящен синтезу систем с переменной структурой для электропривода копающего механизма, фазовое пространство которого не является пространством производных сигнала ошибки. Поверхность переключения выбиралась как функция рассогласований между текущими значениями координат и их желаемыми значениями.

Математическое описание линеаризованного объекта управления при определенных общепринятых допущениях представляется системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния системы,  $u$  – управляющее воздействие,  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица коэффициентов координат объекта управления,  $\mathbf{b}$  – вектор-столбец управляющего воздействия.

Сведем задачу управления к задаче стабилизации. Для этого введем вектор желаемого состояния  $\mathbf{x}_ж$ .

Для двухмассовой системы Г-Д:

$$\mathbf{x}_ж = [i_B^ж \quad i_a^ж \quad \omega_1^ж \quad M_y^ж \quad \omega_2^ж]^T = [g \quad 0 \quad g \quad 0 \quad g]^T = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1]^T g = \mathbf{l}g$$

где:  $\mathbf{x}_ж$  – вектор желаемого состояния объекта управления в установившемся режиме,  $g$  – задающий сигнал.

Для двухмассовой системы УП-Д:

$$\mathbf{x}_{ж} = \begin{bmatrix} i_a^{ж} & \omega_1^{ж} & M_y^{ж} & \omega_2^{ж} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & g & 0 & g \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T g = \mathbf{l}g$$

Уравнение движения относительно вектора рассогласования с учетом того, что  $\dot{\mathbf{x}}_{ж} = 0$ :

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - \mathbf{b}u - \mathbf{k}g, \quad (2)$$

где  $\mathbf{k} = \mathbf{A}\mathbf{l}$ .

В системе  $\mathbf{k}g$  рассматриваем как возмущающее воздействие, влияние которого на динамику системы можно устранить с помощью разрывного управления.

Уравнение поверхности переключения имеет вид:

$$s = \mathbf{c}\mathbf{e} = 0,$$

где  $\mathbf{c}$  – вектор коэффициентов поверхности переключения размера  $1 \times n$ .

С помощью не особого линейного преобразования  $\mathbf{e}' = \mathbf{M}\mathbf{e}$ , система (2) приведена к регуляторной форме:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}'_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{e}'_1 + \mathbf{a}_{12}\mathbf{e}'_n - \mathbf{k}_1 g \\ \dot{\mathbf{e}}'_n = \mathbf{a}_{21}\mathbf{e}'_1 + \mathbf{a}'_{nn}\mathbf{e}'_n - u - \mathbf{k}'_n g \end{cases}$$

где  $\mathbf{e}'_1$  и  $\mathbf{e}'_n$  – соответственно  $(n-1)$ -мерный и 1-мерный векторы состояния, составленные из компонентов вектора  $\mathbf{e}'$ ,

$$\mathbf{e}' = (\mathbf{e}'_1 \quad \mathbf{e}'_n)^T, \quad \mathbf{e}'_1 = (\mathbf{e}'_1 \quad \mathbf{e}'_2 \quad \dots \quad \mathbf{e}'_{n-1})^T, \quad \mathbf{M}\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}'_{nn} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}\mathbf{k} = \begin{pmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}'_n \end{pmatrix}.$$

Уравнение поверхности разрыва  $s = 0$  относительно новых переменных имеет вид:  $s = \mathbf{c}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{e}' = \mathbf{c}_1\mathbf{e}'_1 + \mathbf{c}'_n\mathbf{e}'_n = 0$ , где  $\mathbf{c}\mathbf{M}^{-1} = (\mathbf{c}_1 \quad \mathbf{c}'_n)$ ,  $\mathbf{c}_1 = (\mathbf{c}'_1 \quad \mathbf{c}'_2 \quad \dots \quad \mathbf{c}'_{n-1})$ , для простоты синтеза принимаем  $\mathbf{c}'_n = 1$ .

Система уравнений, описывающая движение в скользящем режиме:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}'_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{e}'_1 + \mathbf{a}_{12}\mathbf{e}'_n - \mathbf{k}_1 g \\ \mathbf{e}'_n = -\mathbf{c}_1\mathbf{e}'_1 \end{cases}. \quad (3)$$

Данную систему можно рассматривать как разомкнутую с вектором состояния  $\mathbf{e}'_1$ , управлением  $\mathbf{e}'_n$  и возмущением  $g$ . Таким образом, задача определения поверхности переключения сводится к синтезу управления системой (3).

Синтез поверхности переключения проводился без учета возмущающего воздействия, влияние которого скомпенсировано управлением, обеспечивающим выход на режим скольжения и его устойчивость.

Рассмотрено применение методов синтеза поверхности переключения на основе модального управления и на основе минимизации квадратичного критерия оптимальности. Выявлено, что наиболее удобен синтез поверхности переключения на основе минимизации квадратичного функционала.

Для обеспечения устойчивого режима скольжения движения координат на поверхность переключения рассмотрены следующие законы управления:

1. в виде кусочно-линейной функции задающего воздействия и вектора рассогласования

$$u = \left( \alpha \sum_{i=1}^n |e_i| - q |g| \right) \text{sign}(s); \quad (4)$$

2. в виде кусочно-линейной функции задающего воздействия и вектора рассогласования с различными весовыми коэффициентами

$$u = \sum_{i=1}^n \Psi_i^e e_i - \Psi^g g, \quad (5)$$

где элементы  $\Psi_i^e$  и  $\Psi^g$  изменяются по следующим логическим законам:

$$\Psi_i^e = \begin{cases} \alpha_i^e & \text{при } se_i > 0 \\ \beta_i^e & \text{при } se_i < 0 \end{cases}, \text{ где } i = 1 \dots n, \quad \Psi^g = \begin{cases} \alpha^g & \text{при } sg > 0 \\ \beta^g & \text{при } sg < 0 \end{cases},$$

где  $\alpha_i^e, \beta_i^e, \alpha^g, \beta^g$  – постоянные коэффициенты;

3. релейный

$$u = U_0 \text{sign}(s), \quad (6)$$

где  $U_0$  – максимальное напряжение управления ( $U_0 = 1$  в о.е.).

Для определения условий устойчивости режима скольжения использована положительно определенная квадратичная форма  $V = \frac{1}{2} s^2$ .

Значение полной производной по времени квадратичной формы:

$$\frac{dV}{dt} = s\dot{s} < 0. \quad (7)$$

Подстановкой  $\dot{s}$  с учетом управления в неравенство (7) получено значения коэффициентов при рассогласованиях и задающем воздействии

$$\begin{cases} d\alpha > \max(|h_i|) \\ dq < -|p| \end{cases},$$

где  $d = cb$ ,  $h_i$  – элементы вектора-строки  $h = cA$ ,  $p = ck$  для закона управления (4);

$$d\alpha_i^e > h_i, \quad d\beta_i^e < h_i, \quad d\alpha^g > p, \quad d\beta^e < p$$

для закона управления (5);

и условие устойчивости режима скольжения для управления (6)

$$(cAe - ck g) / (c_1 b) < 1.$$

Алгоритмические схемы систем с переменной структурой с рассмотренными законами управления изображены на рисунках 4–6.

Установлено, что для системы Г-Д синтез поверхностей переключения и, соответственно, регуляторов переменной структуры целесообразно осуществлять отдельно для номинальных (пуска, наброса нагрузки) режимов и режима стопорения. Для этого применяются 2 регулятора, которые обеспечивают работу системы по двум различным поверхностям переключения.

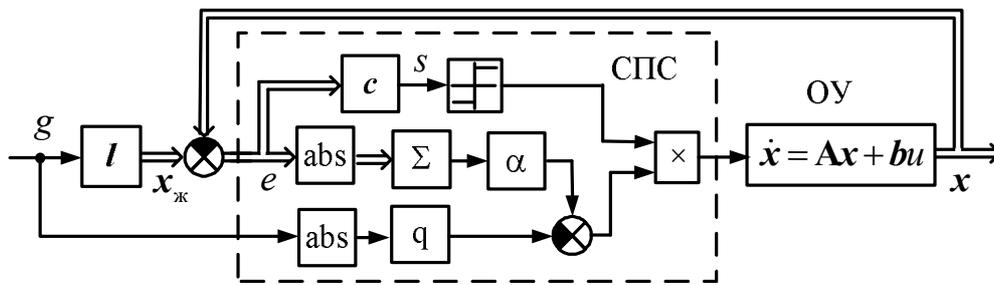


Рис. 4. Система с переменной структурой, построенная на основе управления (4)

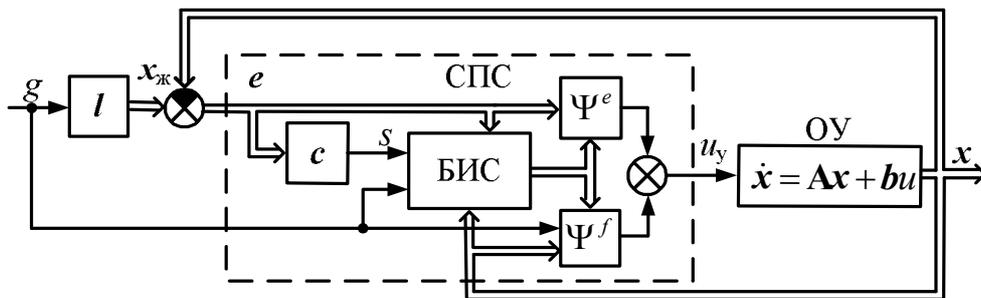


Рис. 5 Система с переменной структурой, построенная на основе управления (5)

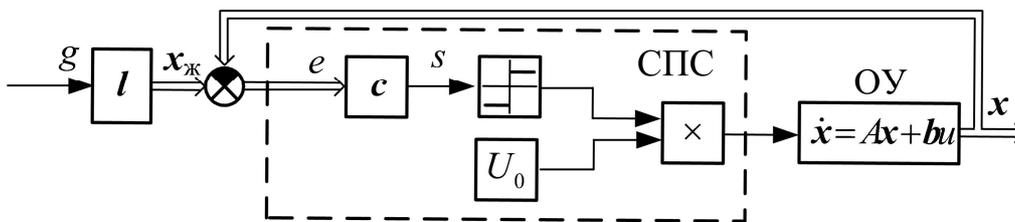


Рис. 6. Система с переменной структурой, построенная на основе управления (6)

В результате исследования влияния коэффициентов критерия оптимальности на динамику были выявлены следующие закономерности и рекомендации по их выбору.

Необходимо чтобы все коэффициенты весовой диагональной матрицы были больше нуля, и при расчете в относительных единицах удобно вначале поставить все равные единице.

В системе Г-Д наибольшее влияние на динамику оказывает весовой коэффициент при рассогласовании тока возбуждения. Его увеличение относительно других приводит к увеличению колебательности ЭДС генератора и тока якорной цепи. Увеличение весового коэффициента при рассогласовании тока якорной цепи приводит к уменьшению тока якоря, что затягивается длительность переходного процесса, однако наряду с этим уменьшаются броски упругого момента в режиме жесткого стопорения. Увеличение весового коэффициента при рассогласовании скорости первой массы приводит к более быстрому стремлению скорости к заданному значению и увеличению жесткости первого участка ЭМХ, однако чрезмерное его увеличение приводит к возникновению колебаний. Изменение весовых коэффициентов при рассогласованиях скорости второй массы и упругого момента не дает существенных изменений динамики ЭМС, но их чрезмерное увеличение приводит к усилению колебаний по этим координатам, что нежелательно.

Таким образом, наиболее рациональным является изменять весовые коэффициенты при рассогласовании тока якорной цепи и скорости первой массы.

Исследования показали, что для системы УП-Д весовые коэффициенты следует выбирать одинаковыми для пар координат: первая пара – рассогласования скоростей первой и второй массы; вторая пара – рассогласования тока якорной цепи и упругого момента.

Причем коэффициенты при рассогласованиях скоростей следует выбирать больше единицы, т.к. в этом случае увеличивается быстродействие системы и ток рекуперации при стопорении, что позволяет снизить амплитуду упругого момента. Однако чрезмерное увеличение их ведет к повышению колебательности системы и может вызвать незатухающие автоколебания скорости и тока.

Снижение коэффициентов при рассогласованиях тока якорной цепи и упругого момента усиливают эффект от повышения коэффициентов при рассогласовании скоростей. Поэтому большое значение имеет отношение коэффициентов при скоростях и моментах.

Таким образом, весовые коэффициенты при рассогласовании  $i_a$  и  $M_y$  следует выбирать меньше 1, а весовые коэффициенты при рассогласовании скоростей больше в 20-25 раз коэффициентов при рассогласовании  $i_a$  и  $M_y$ .

**Четвертый раздел** посвящен синтезу систем с переменной структурой с явной эталонной моделью для управления автоматизированным электроприводом копающего механизма. Предложен способ выбора параметров эталонной модели, заключающийся в синтезе замкнутой следящей оптимальной системы при средних параметрах объекта управления, математическое описание которой и является эталонной моделью.

В процессе работы экскаваторного электропривода при изменении положения ковша в забое и его заполнении породой меняются его массо-инерционные параметры и жесткость упругой связи. Поэтому в исследуемой ЭМС присутствует изменение параметров матрицы коэффициентов координат объекта заранее непредвиденным образом. Это усложняет реализацию управляющего алгоритма во всех режимах работы. Один из возможных путей решения задачи управления в условиях неопределенности параметров состоит в использовании методов адаптации.

Одним из наиболее часто используемых и легко реализуемых является адаптивный алгоритм с эталонной моделью. Эталонная модель – идеальная модель системы управления, воплощающая в себе требования к системе по окончании процесса адаптации. Она может быть реализована в виде отдельного динамического звена (явная эталонная модель) либо в виде набора параметров адаптивного регулятора – коэффициентов некоторого «эталонного дифференциального уравнения» (неявная эталонная модель).

Введем в систему явную эталонную модель, следовательно, целью управления становится сведение к нулю рассогласования между векторами состояния модели и объекта.

Описание эталонной модели выберем линейным:

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{b}_m u_m,$$

где  $\mathbf{x}_m$  – вектор состояния модели,  $\mathbf{A}_m$  и  $\mathbf{b}_m$  – постоянные матрицы, подобранные таким образом, чтобы обеспечить желаемые динамические процессы в модели,  $u_m$  – входное воздействие модели ( $u_m = g(t, i_a)$ ).

Необходимо синтезировать такую функцию управления  $u$  с использованием информации о векторах состояния объекта  $\mathbf{x}$  и модели  $\mathbf{x}_m$  и входном воздействии модели  $u_m$ , чтобы вектор рассогласования  $\mathbf{e} = \mathbf{x}_m - \mathbf{x}$  был сведен к нулю.

Уравнение движения относительно вектора рассогласования:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_m \mathbf{e} - \mathbf{b}u + (\mathbf{A}_m - \mathbf{A})\mathbf{x} + \mathbf{b}_m u_m.$$

Так как рассогласование  $\mathbf{e}$  должно быть сведено к нулю, то векторы  $(\mathbf{A}_m - \mathbf{A})\mathbf{x}$  и  $\mathbf{b}_m u_m$  рассматриваются как возмущающие воздействия, влияние на динамику системы которых можно устранить с помощью разрывного управления.

Математическое описание системы в регуляторной форме после не особого преобразования  $\mathbf{e}' = \mathbf{M}\mathbf{e}$  имеет вид:

$$\dot{\mathbf{e}}' = \mathbf{M}\mathbf{A}_m\mathbf{M}^{-1}\mathbf{e}' - \mathbf{M}\mathbf{b}u + \mathbf{M}(\mathbf{A}_m - \mathbf{A})\mathbf{x} + \mathbf{M}\mathbf{b}_m u_m$$

или

$$\begin{cases} \dot{e}'_1 = \mathbf{A}_{11}e'_1 + a_{12}e'_n + \mathbf{K}_{11}x_1 + k_{12}x_n \\ \dot{e}'_n = a_{21}e'_1 + a'_{nn}e'_n - u + k_{21}x_1 + k_{nn}x_n + b'_n u_m \end{cases},$$

где  $\mathbf{e}_1$  и  $e'_n$  – соответственно  $(n-1)$ -мерный и одномерный векторы состояния из компонент вектора  $\mathbf{e}'$ :  $\mathbf{e}' = (e'_1 \ e'_n)^T$ ,  $\mathbf{e}'_1 = (e'_1 \ e'_2 \ \dots \ e'_{n-1})^T$ ,  $\mathbf{x}' = (x_1 \ e'_n)^T$ ,

$$\mathbf{x}_1 = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1})^T, \quad \mathbf{M}\mathbf{A}_m\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a'_{nn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}(\mathbf{A}_m - \mathbf{A}) = \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{nn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}\mathbf{b}_m = \mathbf{b}'.$$

Уравнение поверхности переключения  $s = 0$  относительно новых переменных

$$s = \mathbf{c}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{e}' = c_1 e'_1 + c'_n e'_n = 0,$$

где  $\mathbf{c}\mathbf{M}^{-1} = (c_1 \ c'_n)$ ,  $\mathbf{c}_1 = (c'_1 \ c'_2 \ \dots \ c'_{n-1})$ , для простоты синтеза принимаем  $c'_n = 1$ .

Система уравнений, описывающая движение в скользящем режиме:

$$\begin{cases} \dot{e}'_1 = \mathbf{A}_{11}e'_1 + a_{12}e'_n + \mathbf{K}_{11}x_1 + k_{12}x_n \\ \dot{e}'_n = -c'_1 e'_1 \end{cases}. \quad (8)$$

Систему (8) можно рассматривать как разомкнутую систему с вектором состояния  $\mathbf{e}'_1$  и управлением  $e'_n$  и измеряемыми возмущениями  $x_1$  и  $x_n$ . Так как мы можем устранить их влияние на динамику замкнутой системы, то для синтеза поверхности переключения мы их действием пренебрегаем. Однако, при определении законов управления, обеспечивающих попадание системы на

поверхность переключения и дальнейшее движение по ней необходимо будет учитывать действующие возмущения.

Нужно отметить, что математическое описание (8) аналогично (3), отличие состоит лишь в возмущающих воздействиях, которые не учитываются при синтезе поверхности переключения, и поверхность переключения находится аналогично как в главе 3.

Для выбора коэффициентов эталонной модели найдем оптимальные коэффициенты обратной связи для ЭМС со средними параметрами для случая, когда желаемое равновесное состояние характеризуется ненулевым положением управляемой переменной.

Математическое описание в смещенных переменных:

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + bu' \\ y' = dx' \end{cases},$$

где  $u' = u - u_0$ ;  $x' = x - x_0$ ;  $y' = y - y_0$ ;  $y_0$  – заданное ненулевое положение управляемой переменной,  $u_0$  – необходимо для достижения  $y_0$  входное воздействие, удерживающее систему в состоянии  $x_0$ ;  $d = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$  или  $d = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$  для двухмассовой Г–Д (в зависимости от того, скорость какой массы необходимо регулировать), или  $d = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$  или  $d = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$  для двухмассовой УП–Д.

Критерий оптимальности:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} (yqu + (u')^2) = \int_{t_0}^{t_1} (x'^T d^T q dx' + (u')^2) = \int_{t_0}^{t_1} (x'^T Q x' + (u')^2),$$

где  $Q = d^T q d$ .

Согласно теории АКОР оптимальное управление имеет вид:

$$u' = -vx',$$

где  $v = b^T P$  – аналитически конструируемый оптимальный регулятор,  $P$  – решение нелинейного матричного алгебраического уравнения

$$PA + A^T P - P b b^T P + Q = 0.$$

В координатах исходной системы закон управления имеет вид:

$$u = -vx + u_0 + vx_0 = -vx + u'_0,$$

где  $u'_0 = u_0 + vx_0$ .

Далее определим постоянную величину  $u'_0$  такую, чтобы в установившемся состоянии управляемая переменная  $y$  достигала своего заданного значения  $y_0$ .

Математическое описание замкнутой системы:

$$\dot{x} = (A - bv)x + bu'_0 = A_3 x + bu'_0, \quad (9)$$

где  $A_3 = (A - bv)$ .

Так как замкнутая система асимптотически устойчива, то при  $t \rightarrow \infty$  ее состояние достигает установившегося значения  $x_0$ , которое удовлетворяет условию  $0 = A_3 x_0 + bu'_0$ .

Отсюда находим  $x_0 = (-A_3)^{-1} b u'_0$ .

Чтобы управляемая переменная приняла заданное значение необходимо выполнение условия  $y_0 = [d(-A_3)^{-1} b] u'_0$ , тогда величина  $u'_0$  имеет вид:

$$u'_0 = [d(-A_3)^{-1} b]^{-1} y_0.$$

Подставим полученное значение  $u'_0$  в (9) находим математическое описание замкнутой системы

$$\dot{x} = A_3 x + b [d(-A_3)^{-1} b]^{-1} y_0,$$

которое и играет роль эталонной модели.

Таким образом, эталонная модель имеет следующий вид:

$$\dot{x}_M = A_M x_M + b_M u_M,$$

где  $A_M = A_3 = (A - bv)$ ,  $b_M = b [d(-A_3)^{-1} b]^{-1}$ ,  $u_M = g = y_0$ .

Алгоритмические схемы системы управления с переменной структурой:

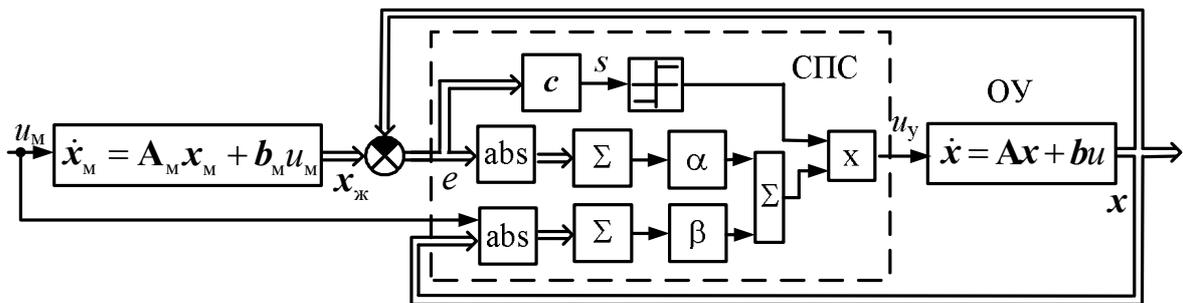


Рис. 7. Структурная схема системы с переменной структурой, построенная на

$$\text{основе управления } u = \left( \alpha \sum_{i=1}^n |e_i| + \beta \sum_{i=1}^n |f_i| \right) \text{sign}(s)$$

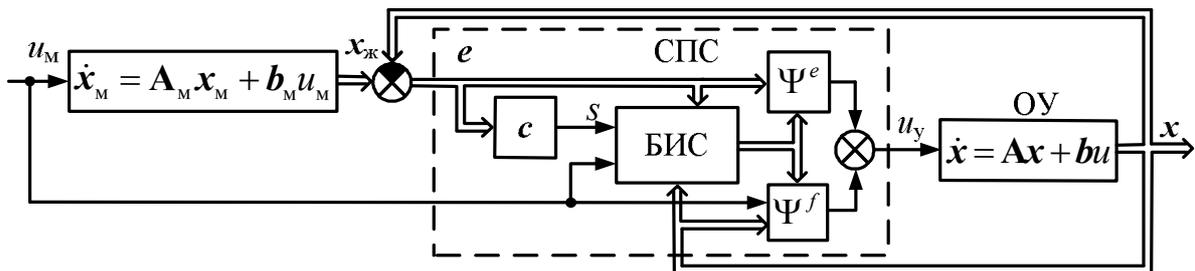


Рис. 8. Структурная схема системы с переменной структурой, построенная на

$$\text{основе управления } u = \sum_{i=1}^n \Psi_i^e e_i + \sum_{i=1}^n \Psi_i^f f_i$$

В результате исследований выявлено, что применение системы управления, основанной на системе с переменной структурой с явной эталонной моделью, позволило получить инвариантную к изменению параметров систему. Также использование в системе с переменной структурой явной эталонной модели значительно уменьшает время вывода замкнутой

системы на режим скольжения, следовательно в режиме скольжения система работает не завершающий этап переходного процесса, а большую часть переходного процесса.

**Пятый раздел** посвящен экспериментальной проверке рассмотренных законов управления на модели электропривода меньшей мощности. Функциональная блок-схема экспериментальной установки изображена на рисунке 9.

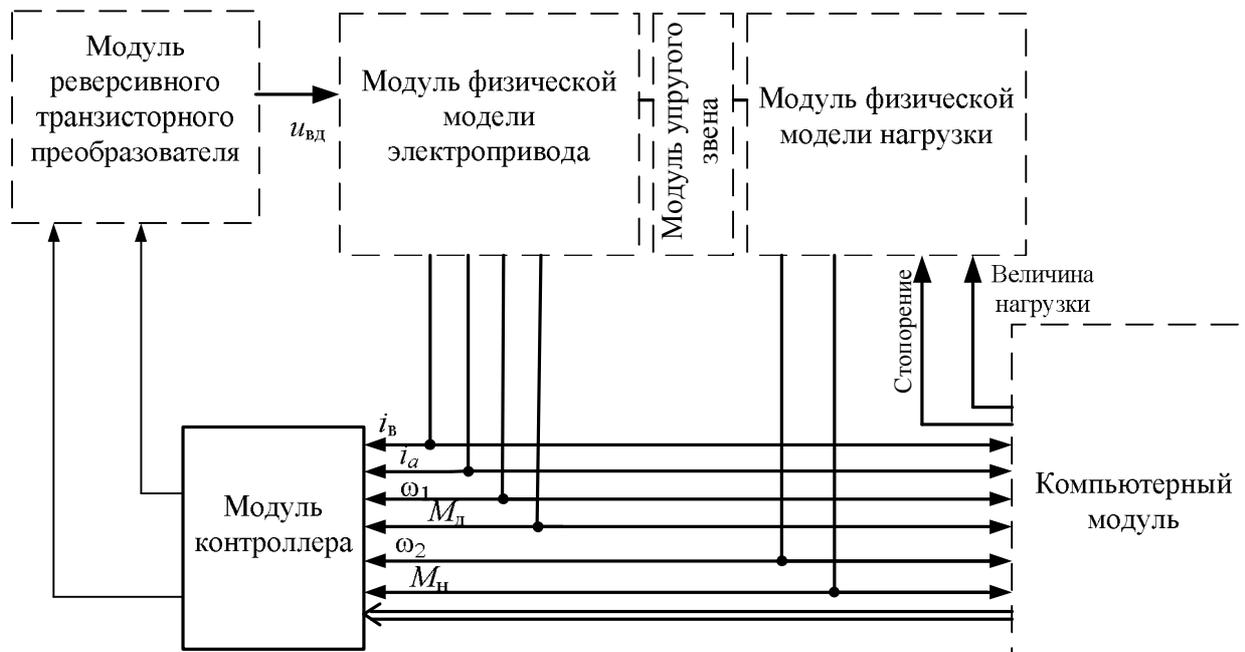


Рис. 9. Функциональная блок-схема экспериментальной установки

Модуль физической модели электропривода представляет собой электромеханическую систему генератор–двигатель, мощностью на несколько порядков ниже экскаваторного электропривода.

Модуль физической модели нагрузки реализован в виде электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, подключенного к генератору постоянного тока. Модуль создает заданную форму и величину нагрузки на валу, приближенную к реальной ситуации на основании сигнала поступающего с компьютерного блока. Также данный модуль позволяет реализовать режим жесткого стопорения.

Модуль физической модели электропривода соединен с модулем физической модели нагрузки через модуль упругого звена.

Силовая часть регулятора реализована в виде реверсивного транзисторного преобразователя, питающего обмотку возбуждения генератора.

Модуль микроконтроллера реализует закон управления координатами электропривода ( $u = U_0 \text{sign}(s)$ ) на основании ассемблерной программы. Результатом обработки полученной информации являются два сигнала, находящихся в противофазе и коммутирующие силовые транзисторные ключи в модуле реверсивного транзисторного преобразователя. Для защиты от

возможности возникновения сквозного тока контроллер вносит некоторое запаздывание в момент открытия запертого ключа.

Через интерфейсную плату РСІ-6023Е осуществляется регистрация координат объекта, а так же формирование цифрового кода команды управления, играющей роль задатчика скорости и направления вращения. Второй функцией этого модуля является формирование сигнала, обеспечивающего заданный режим изменения нагрузки.

Т.к. параметры экспериментальной установки и исследуемого объекта различны, то для проверки теоретических выкладок было произведено моделирование данной установки. Графики переходных процессов представлены в относительных единицах, в качестве базовых взяты номинальные значения координат. При моделировании время указано в секундах, а на графиках, построенных по экспериментальным данным в миллисекундах.

Сравнивая полученные данные, можно видеть, что в экспериментальных данных наблюдаются более сильные колебания токов возбуждения и якорной цепи, которые возможно вызваны большим запаздыванием переключений установки, чем при моделировании. Также при эксперименте ток якорной цепи и упругий момент имеют большие значения по сравнению с результатами моделирования, что объясняется наличием сухого трения в подшипниковом и щеточно-коллекторных узлах двигателя, не учтенными при моделировании. В целом результаты моделирования и эксперимента близки друг к другу. Таким образом, экспериментальные переходные процессы подтверждают результаты моделирования и теоретические рассуждения.

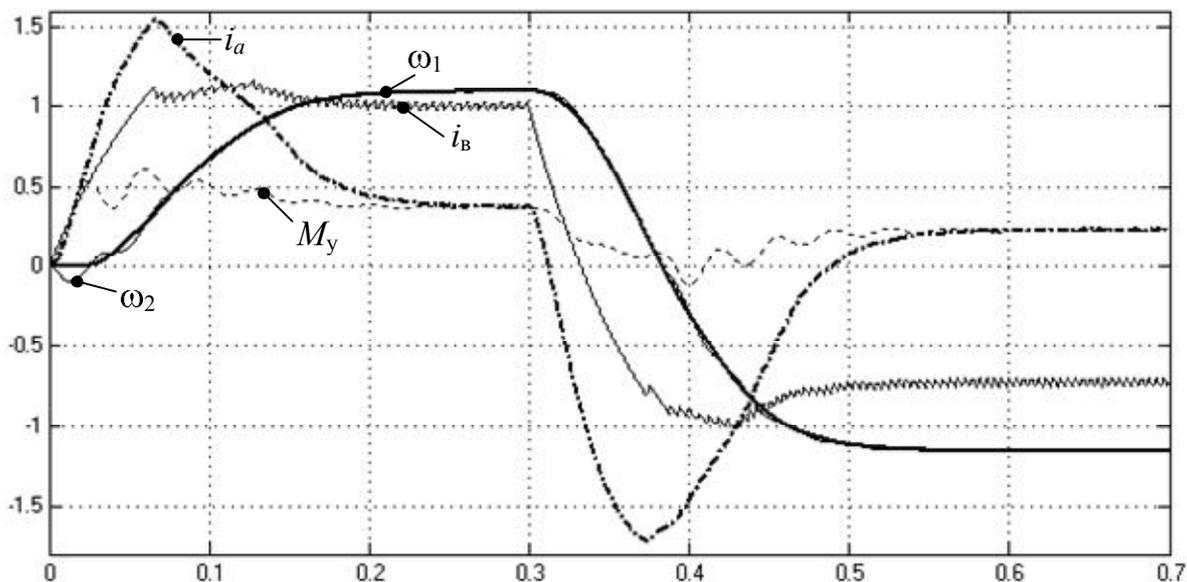


Рис. 10. Переходные процессы моделирования пуска и реверса с активной нагрузкой 30% номинальной

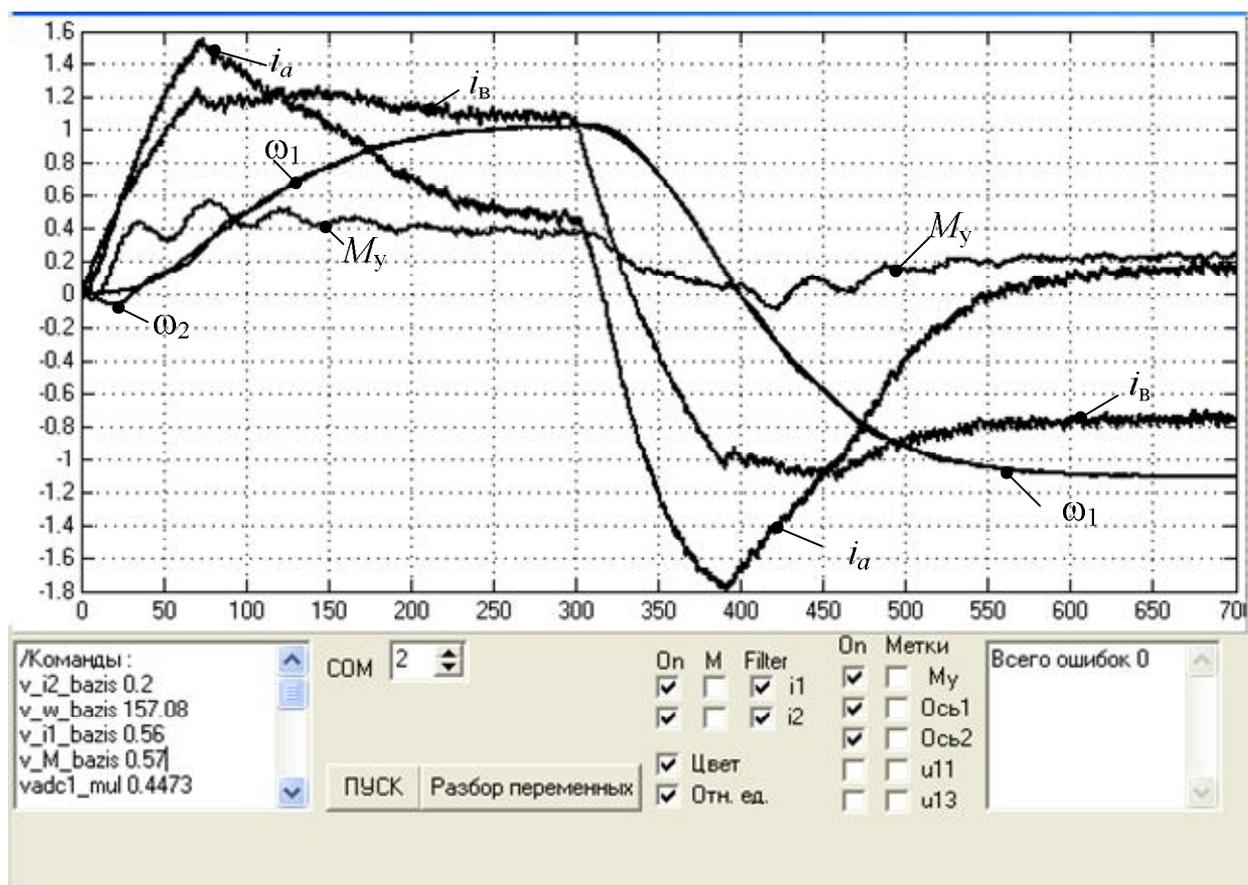


Рис. 11. Экспериментальные переходные процессы при пуске и реверсе с активной нагрузкой 30% номинальной

### Заключение

В работе были рассмотрены различные варианты синтеза систем управления с использованием скользящих режимов для электропривода копающего механизма экскаватора, выполненного по системе генератор – двигатель и по системе управляемый преобразователь – двигатель. Применение скользящих режимов в управлении позволяет получить инвариантную к внешним возмущениям и изменению параметров систему и снизить максимальный бросок упругого момента при жестком стопорении.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан способ синтеза комбинированных систем с переменной структурой для электропривода копающего механизма, заключающаяся в последовательной коррекции внутренних координат и синтезом СПС для выходной координаты (скорости). Это позволяет понизить порядок дифференциального уравнения, описывающего объект управления и упростить дальнейший синтез СПС.

2. Использование в управлении систем с переменной структурой позволяет более качественно производить обработку задающих воздействий по сравнению с системами подчиненного регулирования, применяемыми в экскаваторном электроприводе в настоящее время.

3. Применение СПС для регулирования второй массой в экскаваторном электроприводе при представлении в качестве фазового пространства ошибки

регулирования и ее производными крайне затруднительно, т. к. требует измерения производных до порядка системы (для Г-Д 5 порядка, для УП-Д 4 порядка). При этом на динамику значительное влияние начинает оказывать действие инерционности, присущее реальным дифференциаторам, что делает реализацию требуемых законов управления невозможным.

4. Рассмотрены способы формирования поверхности переключения на основе модального метода и минимизации квадратичного функционала. Выявлено, что наиболее удобен способ синтеза поверхности переключения на основе минимизации квадратичного функционала, т. к. наиболее ярко выражена зависимость м/у коэффициентами минимизируемого функционала и показателями качества переходного процесса, чем м/у расположением корней и показателями качества переходного процесса.

5. Исследовано влияние коэффициентов критерия оптимальности на динамические характеристики электропривода системы Г-Д и УП-Д, даны и обоснованы рекомендации по их выбору.

6. Введение в систему с переменной структурой явной эталонной модели позволяет получить инвариантную к изменению параметров объекта систему и значительно уменьшает время выхода системы на режим скольжения, обладающим желаемыми свойствами, следовательно в данном режиме система работает не завершающий этап переходного процесса, а большую часть переходного процесса.

7. Наибольший эффект от применения систем с переменной структурой наблюдается в электроприводе управляемый преобразователь – двигатель, изначально обладающий большим быстродействием.

#### **Список основных работ по теме диссертации**

1. Кочетков, В.П. Теория автоматического управления: учеб. пособие по выполнению контрольной работы [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – филиал СФУ, 2008. – 80 с.

2. Кочетков, В.П. Оптимизация динамики электромеханической системы с помощью систем с переменной структурой [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский, А.В. Коловский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №10(103), С. 42–47.

3. Кочетков, В.П. Оптимизация динамики автоматизированного электропривода с разрывным управлением [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Вестник Сибирского аэрокосмического университета имени М.Ф. Решетнева. – 2011. – №4(37), С. 42– 47.

4. Кочетков, В.П. Применение системы с переменной структурой и явной эталонной модели для управления экскаваторным электроприводом [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2, С. 250 – 253.

5. Пат. 99031 Российская федерация, МПК E02F 9/20. Устройство изменяемой структуры комбинированного управления электроприводом экскаватора [текст] / Кочетков В.П., Кочетков Д.А., Глушкин Е.Я., Коловский А.В., Рублевский И.С.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО

«Сибирский федеральный университет». – № 2010124157/03 ; заявл. 11.06.2010 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. – 3 с.

6. Пат. 101718 Российская федерация, МПК E02F 9/20. Устройство комбинированного оптимального управления электроприводом экскаватора [текст] / Кочетков В.П., Кочетков Д.А., Глушкин Е.Я., Подборский П.Э., Коловский А.В., Рублевский И.С., Лемытский А.Е. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2010139552/03 ; заявл. 24.09.2010 ; опубл. 27.01.2010, Бюл. №3. – 3 с.

7. Исследование прогнозирующего управления электротехническими системами ветровых электростанций [текст] / А.А. Колесников, Е.Я. Глушкин, А.В. Букатов, А.В. Коловский // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – №3(13), – С. 24–26.

8. Коловский, А.В. О выборе весовых коэффициентов при синтезе поверхности переключения в системе с переменной структурой / А.В. Коловский, Н.С. Дьяченко // Вестник Хакасского технического института – филиала ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – 2009. – №28. – С. 62–68.

9. Коловский, А.В. Синтез системы управления с переменной структурой электропривода постоянного тока с изменяемыми параметрами / А.В. Коловский // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: доклады Междунар. научн.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2 – г. Томск: Изд-во В-Спектр, 2007. – С. 43–46.

10. Кочетков, В.П. Автоматизированный экскаваторный электропривод с разрывным управлением и явной эталонной моделью [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С. 89–92.

11. Кочетков, В.П. Оптимизация динамики экскаваторного электропривода с системой управления переменной структуры / В.П. Кочетков, А.В. Коловский: труды V Междунар. (16 Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 154–157.

12. Кочетков, В.П. Применение систем с переменной структурой для управления экскаваторным электроприводом / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: матер. Всерос. научн.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – Кн. 3. – С. 72–76.

13. Кочетков, В.П. Управление электромеханической системой при помощи скользящих режимов / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды IV Всерос. научн.-практ. конф. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. – С. 76–83.