

tion / Hyun Dong-Yub, Lim Chang-Soon, Kim Rae-Young, Hyun Dong-Seok // IECON-2013. Vienna, Austria. Nov. 10–13, 2013. P. 487.

8. MPC Algorithms for Parallel MultiCell Converters / E. Solano, A. Llor, T. Meynard, M. Fadel, G. Gateau, M. Rivera // IECON-2013. Vienna, Austria. Nov. 10–13, 2013. P. 1047.

9. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов; ОАО «Силовые машины», «Электросила». СПб., 2004. 252 с.

10. Особенности моделирования электрических систем в Simulink и методики их расчета по взаимо-

связанным подсистемам / М. Е. Кузин, Т. Нахди, Е. В. Кистанова, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 7. С. 88–95.

11. Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети 400 В, 50 Гц / И. А. Пименова, А. С. Григорян, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 61–66.

12. Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети постоянного напряжения / И. А. Пименова, В. В. Глушаков, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 7. С. 60–66.

M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, V. Yu. Shelyuh, I. A. Pimenova, A. S. Grigorian
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MODELING AND TEST OF TRANSISTOR SYSTEM SELF-EXCITATIONS OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR

We have example of the power source with high power synchronous generator and the activator in which rectifier and one pole PWC are used. The generator is executed high-speed with self-excitation. The algorithm of control system is developed. In the protective system the explosive fuse and discharge resistor are used. Models in Visual Studio and MatLab-Simulink are built, and models are compared by the results of calculations and expenses for computer calculations time. The analysis of operating modes of a source is made.

Synchronous generator, excitation system, Pulse-width converter, modeling, control system, expense of machine time

УДК 62-581

Р. М. Нуриахметов, В. А. Новиков, М. П. Белов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Система управления движением механизмов крана с предотвращением раскачивания груза

Представлен вывод математической модели электромеханической системы тележка–подвес–груз при помощи уравнений Лагранжа. Для полученной математической модели предложена структурная схема системы управления с предотвращением раскачивания груза. Произведено моделирование системы управления в среде Matlab Simulink, получены осциллограммы динамических процессов при перемещении механической системы тележка–подвес–груз.

Подъемно-транспортные машины, системы управления, демпфирование колебаний груза, уравнения Лагранжа

Современные системы управления движением механизмов кранов реализуются на базе средств интегрированных электроприводных систем с различными структурами силовой электрической схемы и системы управления. Варианты структур устанавливаются исходя из типовых движений

механизмов крана при выполнении заданной технологии. Наиболее интенсивные движения механизмов имеют место при встраивании крана в непрерывный технологический процесс.

Распространенным вариантом исполнения силовой схемы электроприводов крана является

схема, в которой каждый электродвигатель питается от индивидуального преобразователя частоты (ПЧ) с диодным выпрямителем. Недостатком такого варианта являются бесполезные потери энергии на резисторах в тормозных режимах приводов. Для кранов с интенсивным режимом работы целесообразно применять ПЧ с активными выпрямителями, которые могут быть или индивидуальными для каждого ПЧ и обеспечивать рекуперацию энергии торможения в сеть переменного тока, или групповым для всех автономных инверторов напряжения приводов. Последний вариант является наиболее энергосберегающим, так как имеется возможность использовать в звене постоянного напряжения энергию торможения одних механизмов для разгона и движения других механизмов. Лучший вариант силовой схемы привода устанавливается технико-экономическим анализом исходя из конкретного режима работы крана в подъемно-транспортной технологии.

Аналогично нескольким вариантам выполнения силовой схемы привода имеются варианты

выполнения системы управления. На рис. 1 представлен вариант структурной схемы системы управления мостовым краном с централизованной системой сбора и обработки информации, ядром которой является программируемый логический контроллер (ПЛК). Обмен информацией между ПЛК, ПЧ и модулями распределенного ввода-вывода осуществляется по промышленной сети, в качестве которой применяется одна из распространенных сетей – Modbus RTU, Profibus DP, DeviceNet, Ethernet, EtherCAT и др. В ПЛК входят: блок питания; модули центрального процессора (CPU), дискретных входов и выходов, промышленной сети. На схеме обозначены механизмы МГП, МВП, МПМ, МПТ – главного и вспомогательного подъема, перемещений моста и тележки соответственно.

Применяется и вариант структуры системы управления с децентрализованной системой сбора и обработки информации. В таком варианте используются собственные программируемые

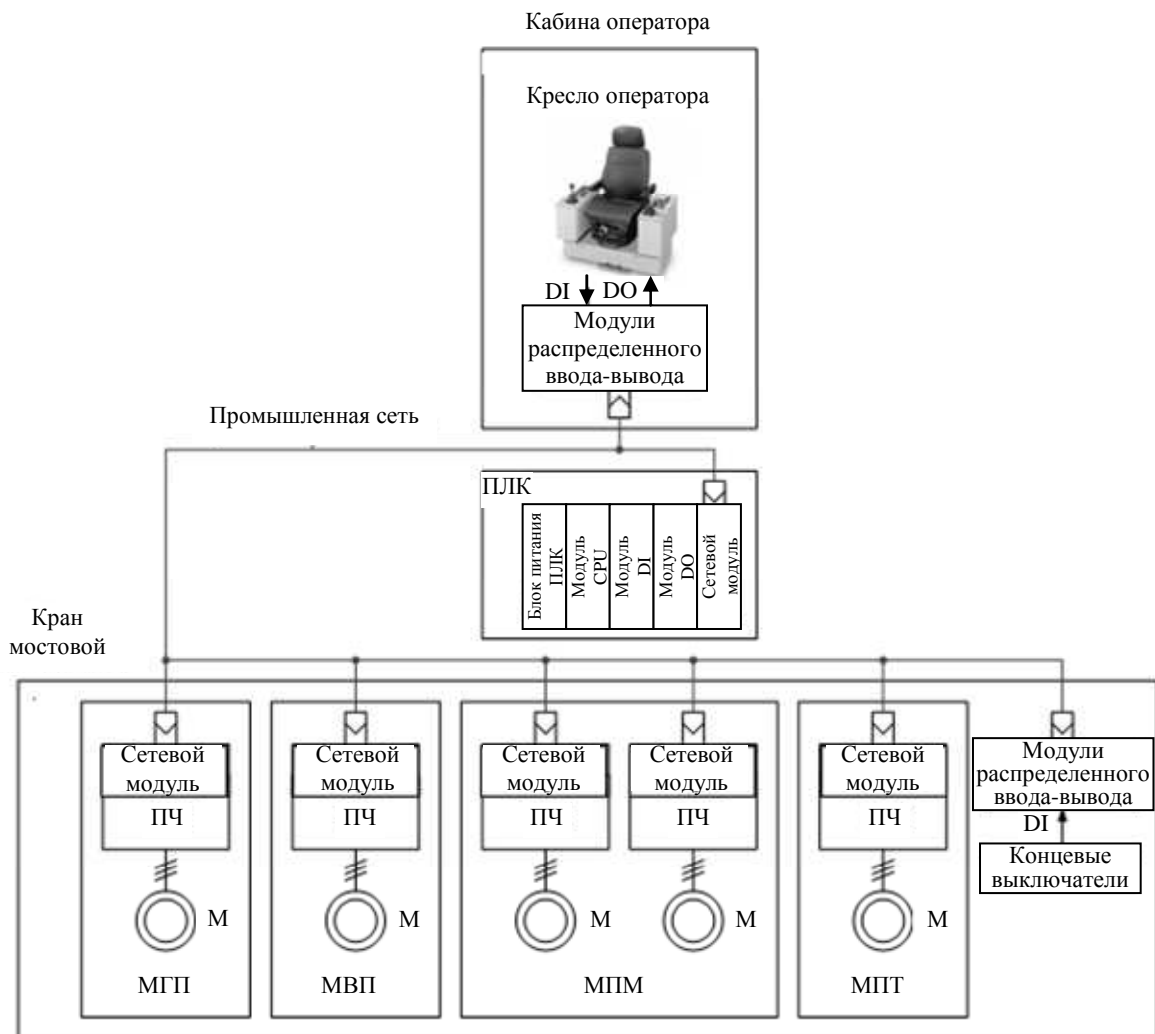


Рис. 1

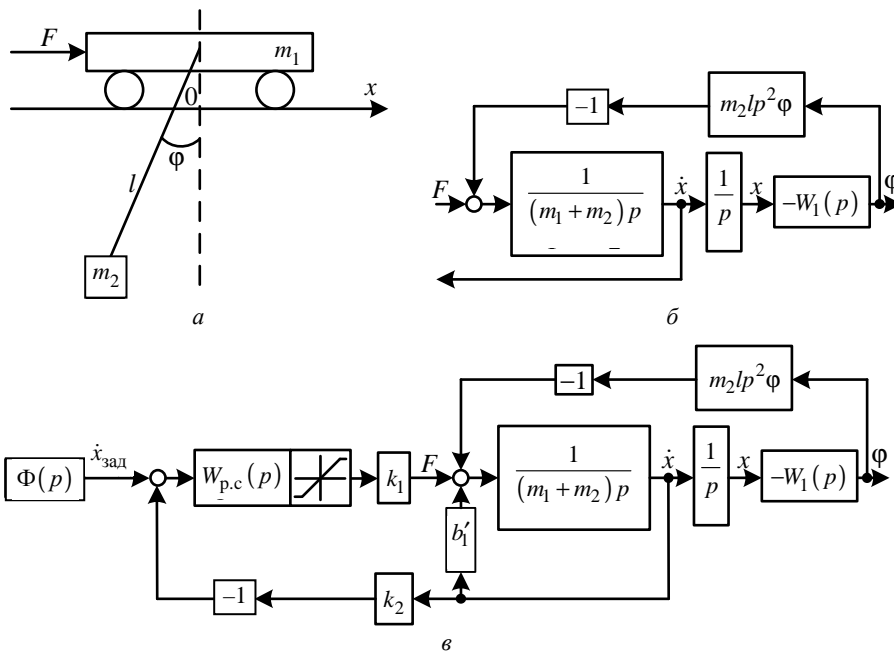


Рис. 2

контроллеры каждого ПЧ, которые выполняют заложенные в них функции управления и диагностики, обмениваясь информацией между собой и модулями распределенного ввода-вывода по промышленной сети.

Оба варианта систем управления по сравнению с традиционными системами могут реализовывать ряд дополнительных функций, повышающих эффективность кранов: программного управления движением, предотвращения раскачивания груза, выравнивания нагрузки электроприводов моста; контроля выполнения технологического процесса средствами визуального представления информации, таких как промышленные панели оператора, SCADA-системы; высокой надежности работы за счет использования отказоустойчивых компонентов автоматизации и надежного сетевого протокола. Из всех дополнительных функций наиболее привлекательной является функция предотвращения раскачивания груза, так как она способствует повышению производительности и качества работы крана.

Выполним здесь математическое описание и исследуем динамические процессы в системе предотвращения раскачивания груза на примере управления движением тележки мостового крана. Механическая система тележка–подвес–груз представлена на рис. 2, а. Структурные схемы механической системы и замкнутой системы управления представлены на рис. 2, б и в соответственно. Приняты следующие обозначения: m_1 –

масса тележки; m_2 – масса груза; l – длина подвеса; F – сила, приложенная к тележке; ϕ – угол отклонения груза от положения равновесия. Примем условия: подвес представляется невесомой нерастяжимой нитью, масса m_1 сконцентрирована в центре масс тележки, масса m_2 – в точке крепления груза к подвесу.

Составим уравнения Лагранжа для представленной механической системы. В общем случае для i -й степени свободы уравнения Лагранжа имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где $L = T - \Pi$ – функция Лагранжа (T , Π – суммарный запас кинетической и потенциальной энергий системы соответственно); q_i , \dot{q}_i – обобщенные координаты и скорости; Q_i – обобщенные неконсервативные силы).

Примем в качестве обобщенных координат x и ϕ . При этом кинетическая и потенциальная энергии системы могут быть определены по формулам

$$T = (m_1 + m_2) \frac{\dot{x}^2}{2} + m_2 l \dot{x} \dot{\phi} \cos \phi + J_{\text{гр}} \frac{\dot{\phi}^2}{2},$$

$$\Pi = -m_2 g l \cos \phi,$$

где $J_{\text{гр}} = l^2 m_2$ – момент инерции груза; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Таким образом, функцию Лагранжа для данной системы можно записать в виде

$$L = T - \Pi = (m_1 + m_2) \frac{\dot{x}^2}{2} + m_2 l \dot{\varphi} \cos \varphi + J_{\text{гр}} \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + m_2 g l \cos \varphi. \quad (2)$$

Обобщенные силы, соответствующие принятым обобщенным координатам:

$$Q_x = F; \quad (3)$$

$$Q_\varphi = 0. \quad (4)$$

Подставив выражения (2)–(4) в уравнения Лагранжа (1) и проведя дифференцирование, получим:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = F, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_i} = m_2 l \dot{x} \cos \varphi + m_2 l^2 \ddot{\varphi} + m_2 g l \sin \varphi = 0. \quad (6)$$

При малых угла отклонения груза от положения равновесия (5...10°) справедливы следующие равенства:

$$\cos \varphi \approx 1; \quad \sin \varphi \approx \varphi; \quad \dot{\varphi}^2 \approx 0. \quad (7)$$

С учетом (7) выражения (5) и (6) можно записать в упрощенном виде:

$$(m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} = F; \\ \ddot{x} + l \ddot{\varphi} + g \varphi = 0$$

или

$$(m_1 + m_2) p^2 x + m_2 l p^2 \varphi = F; \quad (8)$$

$$p^2 x + l p^2 \varphi + g \varphi = 0, \quad (9)$$

где $p = \frac{d}{dt}$.

Таким образом, получены линеаризованные уравнения, описывающие механическую систему тележка–подвес–груз. На основании этого описания составим математическую модель электромеханической системы механизма передвижения тележки и системы управления движением механизмов крана с предотвращением раскачивания груза.

Из (9) найдем соотношение между переменными x и φ :

$$\frac{\varphi}{x} = \frac{-p^2}{l p^2 + g} = -W_1(p). \quad (10)$$

Преобразуем передаточную функцию $W_1(p)$ к стандартному виду колебательного звена:

$$W_1(p) = \frac{p^2}{g \left(\frac{l}{g} p^2 + 1 \right)} = \frac{(1/g) p^2}{T_1^2 p^2 + 1},$$

где $T_1 = \sqrt{\frac{l}{g}}$ – постоянная времени звена.

Частота собственных колебаний груза определяется формулой $\omega_{\text{г}} = \frac{1}{T_1} = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Из (8) выразим переменную x :

$$x = \frac{F - m_2 l p^2 \varphi}{(m_1 + m_2) p^2}. \quad (11)$$

На основании (10) и (11) построим разомкнутую по скорости структурную схему рассматриваемой механической системы. Данная структурная схема представлена на рис. 2, б.

С учетом демпфирования колебаний груза, обусловленного силами сопротивления движению груза, уравнение (9) можно переписать в следующем виде:

$$p^2 x + l p^2 \varphi + b_1 p \varphi + g \varphi = 0,$$

где b_1 – коэффициент, характеризующий действие сил сопротивления движению груза.

При этом передаточная функция $W_1(p)$ примет следующий вид:

$$W_1(p) = \frac{(1/g) p^2}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$$

где ξ – коэффициент затухания.

Учтем также силу трения, действующую на тележку при ее линейном перемещении по конструкции моста. В общем случае действие силы трения выражается сложной аналитической зависимостью, однако в первом приближении примем ее пропорциональной скорости линейного перемещения тележки и равной $F_{\text{тр}} = b'_1 p x$, где b'_1 – коэффициент пропорциональности. При этом уравнение (8) будет записано в следующем виде:

$$(m_1 + m_2) p^2 x + b'_1 p x + m_2 l p^2 \varphi = F.$$

С учетом изменений, внесенных в (8), структурная схема системы управления линейной скоростью движения тележки примет вид, представ-

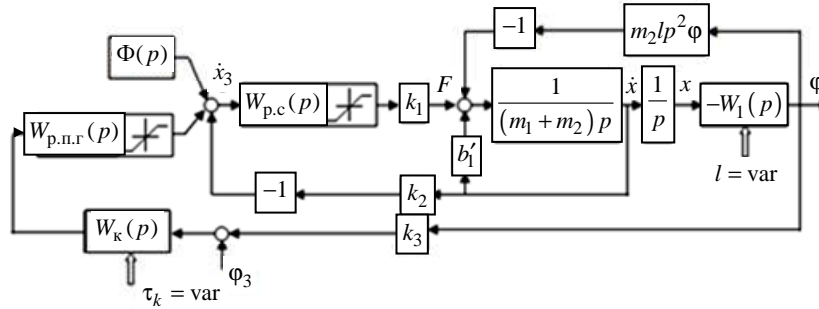


Рис. 3

ленный на рис. 2, в. Приняты следующие обозначения: $\Phi(p)$ – формирователь задания скорости движения тележки; $\dot{x}_{зад}$ – заданное значение скорости движения тележки; $W_{p.c}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; k_1 – коэффициент, отражающий электромагнитные процессы в приводе и служащий для приведения электромагнитного момента электродвигателя к линейной силе, действующей на тележку; k_2 – коэффициент отрицательной обратной связи по скорости. Ввиду высокого быстродействия электромагнитных процессов они рассматриваются в системе управления движением груза как безынерционные. При необходимости можно использовать упрощенные или полные математические модели электромагнитных процессов в частотно-регулируемом электроприводе, приведенные, например, в [1].

В качестве регулятора скорости можно выбрать П- или ПИ-регуляторы. Для простоты возможно использование П-регулятора, коэффициент которого определяется формулой

$$W_{p.c}(p) = k_{p.c} = \frac{\omega_{cp}}{k_1 k_2 \frac{1}{(m_1 + m_2)}},$$

где ω_{cp} – частота среза контура скорости.

Система управления движением механизмов крана с предотвращением раскачивания груза кроме контура регулирования скорости должна иметь контур регулирования углового положения груза, являющегося внешним контуром системы. Структурная схема такой системы представлена на рис. 3.

Кроме регулятора положения груза $W_{p.п.г}(p)$ в контуре регулирования может присутствовать звено компенсации колебаний груза $W_k(p)$ с самонастройкой параметров при изменении частоты колебаний, вызванной изменениями длины

каната подвеса груза. Регулятор положения груза может быть П- или ПИ-регулятором. Расчеты параметров регулятора традиционны для систем с каскадным регулированием переменных. Отсутствие звена компенсации возможно в том случае, когда частота среза контура положения груза будет много больше частоты колебаний груза при минимальной длине его подвеса, т. е.

$$\omega_{cp \phi} \geq (7 \dots 10) \omega_{\Gamma}, \quad (12)$$

Задание по углу отклонения груза можно установить нулевым, и тогда сигнал, поступающий на контур регулирования скорости от регулятора положения груза, можно рассматривать как корректирующий сигнал, а основное управление движением тележки будет осуществляться воздействием на контур регулирования скорости.

На рис. 4 представлены результаты моделирования системы управления механизмом передвижения тележки, выполненного в вычислительной среде Matlab Simulink. Показаны сравнительные осциллограммы угла отклонения груза от положения равновесия (рис. 4, а), скорости (рис. 4, б) и положения тележки (рис. 4, в) при исходных параметрах и единичном ступенчатом входном воздействии для разомкнутой (1) и замкнутой по углу отклонения груза (2) систем управления. Применен П-регулятор положения груза. Как можно видеть из полученных осциллограмм, замкнутая система управления с простейшим регулятором оказывается эффективной в демпфировании колебаний груза.

В качестве датчика угла отклонения груза от положения равновесия могут использоваться видеодатчики, гироскопы, лазерные датчики, акселерометры с интеграторами. Эти средства позволяют измерять отклонение груза при одновременном передвижении моста и тележки, благодаря чему возможна реализация алгоритмов управления при совместной работе этих механизмов.

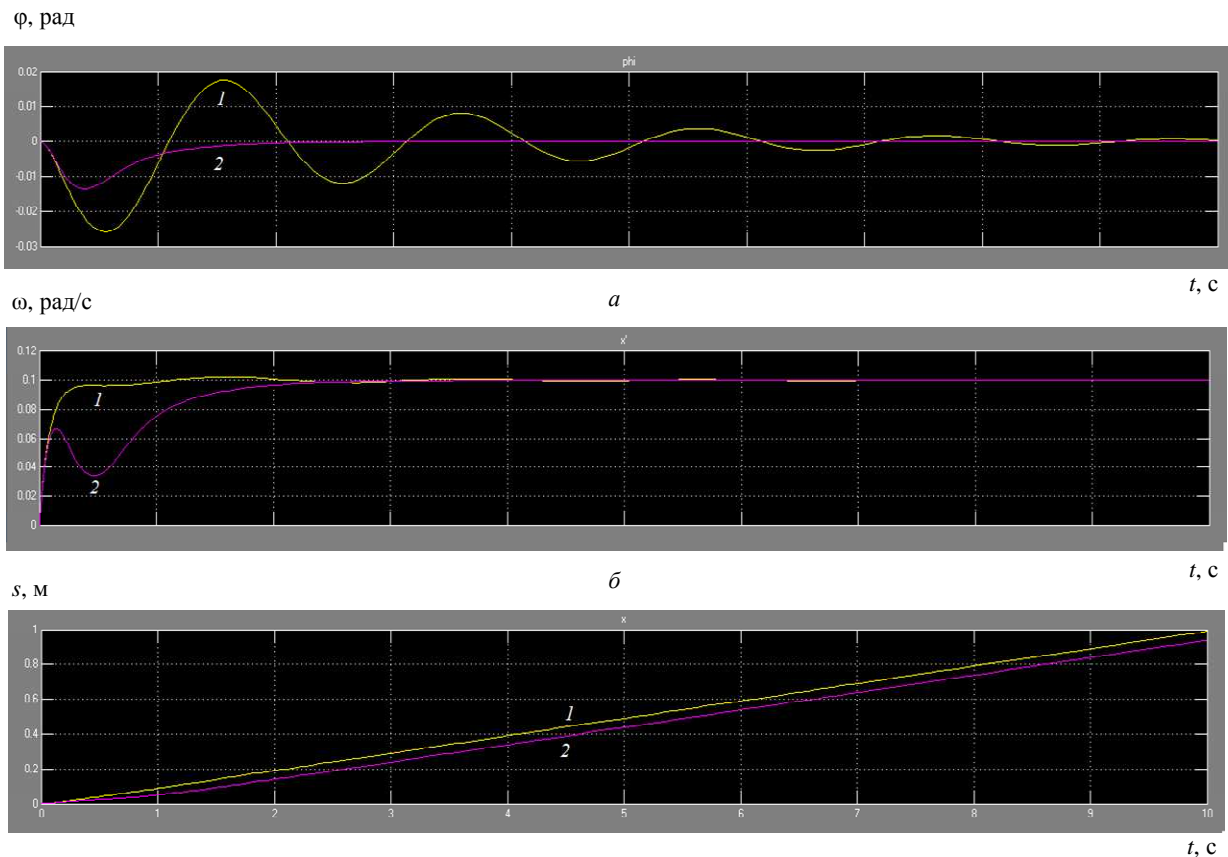


Рис. 4

Если условие (12) не выполняется, то необходимо применить звено компенсации $W_K(p)$ с самонастройкой параметров при изменении частоты колебаний. Это звено представляет собой фильтр подавления колебаний, содержащий полосовые фильтры и модуль компенсации с передаточной функцией:

$$W_K(p) = \frac{\tau_K^2 p^2 + 2\xi_K \tau_K p + 1}{(\tau_K p + 1)^2}.$$

Этот модуль настраивается из условия $\tau_K = T_1$. Принцип самонастройки звена компенсации при изменении частоты колебаний в дан-

ном случае такой же, как при компенсации упругих механических колебаний в податливых механических конструкциях. Этот принцип фазовой самонастройки раскрыт в [2].

Результаты проведенных исследований показали, что для разработки систем управления движением механизмов крана с предотвращением раскачивания груза, для обеспечения заданных динамических характеристик необходимо использование уравнений Лагранжа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.

2. Новиков В. А., Ануфриев А. С., Нуриахметов Р. М. Динамика многодвигательных электроприводных систем с упругими механическими подсистемами // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 7. С. 70–75.

R. M. Nuriakhmetov, V. A. Novikov, M. P. Belov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

CRANE ANTI-SWAY CONTROL SYSTEM

A mathematical model of trolley-rope-load mechanical system is derived by use of Lagrange equations. Depends on the mathematical model, structure scheme of anti-sway control system is given. Model of anti-sway control system is made and tested in Matlab Simulink program. Oscillograms of dynamic processes of trolley-rope-load mechanical system movement are obtained.

Crane, control system, anti-sway control, Lagrange equations

УДК 621.317.38

Д. В. Ишутинов, Е. Н. Малышев, Э. В. Москвин
Вятский государственный университет «ВятГУ»

Синтез оптимальной структуры датчика реактивной мощности

Рассмотрена оптимизация структуры датчика реактивной мощности с применением логико-комбинаторного подхода. Показаны альтернативные структуры датчика, получены их математические описания в виде характеристической булевой функции и проведена оптимизация структур по критерию сложности реализации.

Датчик реактивной мощности, логико-комбинаторный подход, характеристическая булева функция, аппаратная реализация, программная реализация, критерий оптимизации, оптимальная структура

Применение устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) в электрических сетях обеспечивает энергосбережение и повышает энергоэффективность потребителей электрической энергии. Статические УКРМ состоят из конденсаторной батареи, силовых коммутационных аппаратов и системы управления, основным элементом которой является датчик реактивной мощности (ДРМ).

Выбор оптимальной структуры является наиболее сложным этапом при проектировании технических устройств. Известны два подхода к учету множества альтернативных вариантов структуры – неформализованные и формализованные. При *первом* происходит интуитивный синтез устройства на основе накопленных знаний [1], *второй* основан на эквивалентных преобразованиях структуры или закона функционирования проектируемого устройства. Из известных формализованных методов [2], [3] авторами используется логико-комбинаторный подход (ЛКП).

Методика синтеза и оптимизации структуры с помощью ЛКП предусматривает следующие этапы [3], [4]:

- 1) задание закона функционирования, отражающего постановку задачи проектирования;
- 2) составление максимально-избыточной структуры (МИС) устройства;
- 3) представление вариантов структуры в форме характеристической булевой функции (ХБФ);
- 4) оптимизацию вариантов структуры по выбранному критерию.

Первый этап. Сигналы, пропорциональные модулю U_q и знаку Us_q , отражающему характер (индуктивный, емкостный, активный) реактивной мощности (РМ), вычисляются по выражениям

$$U_q = k\sqrt{3} \cdot U_{AB} I_C \sin \varphi; \quad Us_q = \text{sign}(I_C \sin \varphi), \quad (1)$$

где $k = U_q/Q$ – коэффициент передачи ДРМ; U_{AB} , I_C – действующее значение линейного напряжения и тока трехфазной сети; φ – фазовый сдвиг между кривыми напряжения и тока.