

На рис. 6 представлена зависимость изменения времени регулирования синтезированной САУ от положения узлов интерполирования.

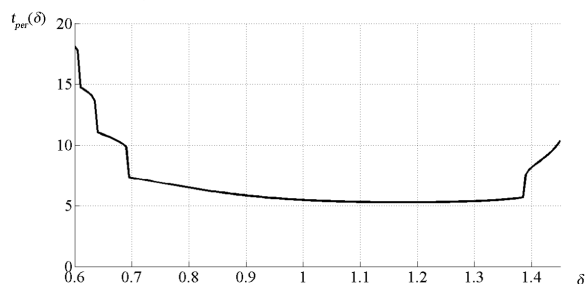


Рис. 6. Зависимость времени регулирования синтезированной САУ от δ

Наилучшее приближение времени регулирования к желаемому значению наблюдается при $\delta=1,2$.

В данном случае нет возможности полностью обеспечить выполнение заданных требований по

качеству регулирования путем подбора узлов интерполирования. Выполнение заданных требований к качеству регулирования можно обеспечить, задав другую структуру регулятора, также можно изменить исходные требования.

Заключение

Основной проблемой при синтезе систем автоматического управления на основе вещественного интерполяционного метода является выбор расположения узлов интерполирования. Это обусловлено тем, что существующие математические выражения для выбора узлов зачастую не обеспечивают желаемого результата при идентификации объектов управления и синтезе САУ.

В работе показано влияние положения узлов интерполирования на основные показатели качества синтезированной САУ. В зависимости от значимости требований к системе возможен выбор критерия для выбора узлов интерполирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г., Рутковский В.Ю. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем // Известия АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 11–23.
2. Гончаров В.И. Вещественный интерполяционный метод синтеза систем автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 1995. – 108 с.
3. Гончаров В.И., Лиепиньш А.В., Рудницкий В.А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 4. – С. 36–43.
4. Гончаров В.И. Синтез электромеханических систем промышленных роботов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 100 с.

Поступила в печать 22.04.2009 г.

УДК 681.518.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

А.С. Алексеев, С.В. Замятин, Д.А. Плотников

Томский политехнический университет
E-mail: aleksejev@sibmail.com

На основе вещественного интерполяционного метода разработана методика определения момента инерции в электроприводе. Расчет осуществляется по временным сигналам произвольной формы с высокой точностью. Эффективность методики подтверждена на численном примере.

Ключевые слова:

Электропривод, определение момента инерции, вещественный интерполяционный метод.

Введение

Для повышения качества управления и реализации самонастраивающихся систем управления всё более важными становятся вопросы определения параметров электропривода. Применение микропроцессорных систем в современных следящих приводах позволяет решить эту задачу.

Вопросам вычисления параметров электропривода постоянного тока посвящено большое количество работ [1–4]. В [1] авторы отмечают, что из усло-

вий наблюдаемости параметры электропривода могут быть определены только в динамическом режиме. Рассматривается вопрос вычисления параметров электромеханической системы за счет изменения напряжения, приложенного к якорю двигателя. Установлены необходимые минимальные значения амплитуд гармонических составляющих выходного напряжения тиристорного преобразователя, которые позволяют определить требуемые параметры. В работе [2] отмечено, что найти параметры привода постоянного тока при наличии гармонических со-

ставляющих затруднительно. Задачу предлагается решать на основе уравнений энергетического баланса. Недостатком является то, что для вычисления параметров принимается достаточно узкий диапазон изменения момента инерции ($\pm 6\%$). В [3] для определения параметров привода применяется автоматизированный комплекс. В данном случае недостаток обусловлен возникновением ошибок (5...35%), связанных с дискретизацией сигналов. В [4] рассмотрено применение нечеткой нейронной рекуррентной многомодельной сети для получения модели сложных нелинейных объектов на примере электропривода постоянного тока. Такая система позволяет обеспечить высокую точность (порядка 2%), однако требует значительных вычислительных ресурсов и не позволяет получить в явном виде параметры необходимые для настройки регуляторов.

Целью статьи является разработка методики определения момента инерции в замкнутом электроприводе по конечным временным выборкам измеряемых сигналов с высокой точностью.

1. Постановка задачи

Динамическую модель электропривода на базе коллекторного или бесколлекторного двигателя постоянного тока можно представить в виде типовой операторно-структурной схемы [5].

На рис. 1 представлена структурная схема замкнутого электропривода, содержащая контур тока, скорости и положения. На схеме приняты следующие обозначения: $W_{PI}(p)$, $W_{PC}(p)$, $W_{PT}(p)$ – передаточные функции (ПФ) регуляторов положения, скорости и тока соответственно; $W_{ЭЧ}(p)$ – ПФ электрической части привода, которая описывает процессы, протекающие в обмотке двигателя и транзисторном преобразователе; C_m – постоянная момента двигателя; J – приведенный к валу двигателя момент инерции механической части системы; K_{II} , K_C , K_T – коэффициенты обратных связей по положению, скорости и току соответственно; p – оператор Лапласа; $q_{жс}$, $\dot{q}_{жс}$, $i_{жс}$ – желаемые задающие функции для контуров положения, скорости и тока; q , \dot{q} , i –

текущие значения сигналов положения, скорости и тока; M_c – момент сопротивления на валу двигателя; M – момент, развиваемый электроприводом в нагруженном режиме. На рис. 1 не показана связь по ЭДС, т. к. ей можно пренебречь, поскольку привод замкнут обратными связями [5].

В общем случае, в приведенной системе неизвестными, которые подлежат определению, являются момент инерции J и момент сопротивления M_c . Неопределенность первого параметра влияет на динамическую точность системы, наличие возмущающего сигнала M_c приводит к снижению точности в статическом режиме работы системы управления.

В [6, 7] доказано, что путем введения дополнительных связей в систему управления сервопривода можно исключить действие внешних возмущающих воздействий. Это достигается за счет вычисления разности между реальным усилием, развиваемым двигателем в нагруженном режиме, и тем усилием, которое формирует система управления без учета возмущающих сигналов. Такой подход позволяет косвенно оценить значение момента сопротивления M_c и по этой оценке реализовать канал управления по возмущению, тем самым, снизив влияние внешних возмущений до пренебрежимо малого уровня (т. е. $M_c \approx 0$). Последнее позволяет при расчетах не учитывать сигнал возмущения.

Таким образом, рассмотрим задачу определения момента инерции J в замкнутом электроприводе по переходным характеристикам на основе вещественного интерполяционного метода.

2. Вещественный интерполяционный метод

Для решения задачи в работе используется вещественный интерполяционный метод (ВИМ) [8]. Метод позволяет формировать численные модели динамических объектов и совершать действия над ними, которые оказываются экономными в вычислительном отношении. Приведем краткое обоснование выбора метода и его особенности.

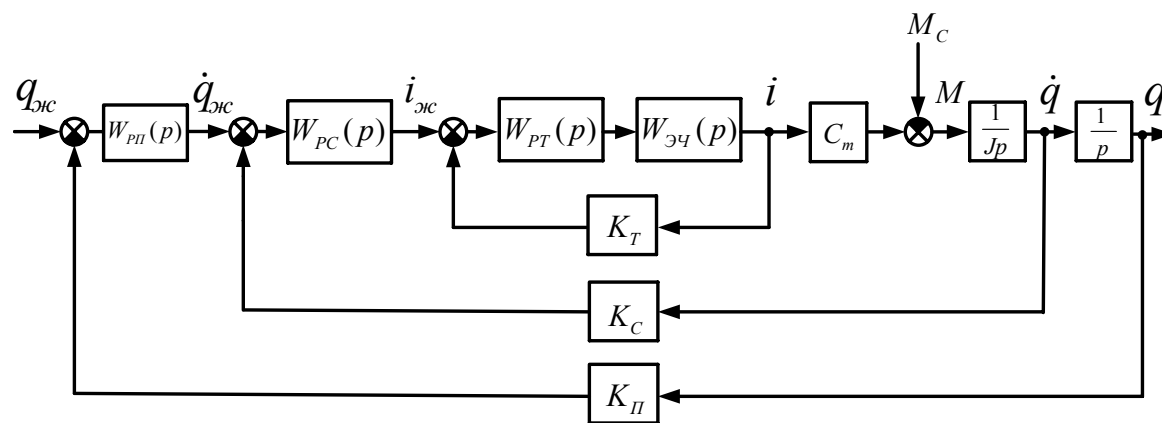


Рис. 1. Операторно-структурная схема замкнутого электропривода

Основой метода является преобразование Лапласа. Формула прямого перехода имеет вид

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt, \quad p = \delta + j\omega \quad (1)$$

и ставит в соответствие функции-оригиналу $f(t)$ изображение $F(p)$. Можно выделить два частных случая: а) $p=j\omega$, когда $\delta=0$; б) $p=\delta$, когда $\omega=0$. В первом случае получают частотные модели $F(j\omega)$, которые обладают многими достоинствами: имеют ясный практический смысл, хорошо разработанный математический аппарат действий над ними, в том числе для решения задач идентификации объектов управления, аппроксимации сложных передаточных функций, синтеза регуляторов и т. д. К сожалению, модели вида $F(j\omega)$ неудобны с позиций выполнения численных операций. Причина – наличие мнимой переменной $j\omega$.

Во втором случае указанный недостаток устранен, так как формула (1) заменяется соотношением

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [C, \infty], \quad C \geq 0, \quad (2)$$

в котором изображение $F(\delta)$ имеет вещественный аргумент δ [8]. Последнее позволяет привлекать любые численные методы, разработанные для функций с вещественным аргументом.

Обратим внимание на другие особенности второго варианта. Во многих задачах они проявляются как существенные достоинства. Выделим основные из них:

- функции $F(\delta)$ могут быть представлены дискретными моделями в виде численных характеристик $\{F(\delta)\}_i, i=\overline{1, \eta}$ и восстановлены интерполяционным методом; при этом число операций более чем в два раза ниже по сравнению с альтернативными частотными моделями $\{F(j\omega)\}_i, i=\overline{1, \eta}$;
- модели $\{F(\delta)\}_i, i=\overline{1, \eta}$ можно представить в матричной форме, в том числе в диагональной $\text{diag} F(\delta) = [F(\delta_1), \dots, F(\delta_\eta)]$, что практически снимает проблему обращения матриц;
- возможность получения моделей $\{F(\delta)\}_i, i=\overline{1, \eta}$ по экспериментальным характеристикам $f(t_j), j=1, 2, \dots, N$ при численном интегрировании в (2);
- при соблюдении достаточно простых условий [8] возможен переход от изображений Лапласа в вещественную область путем прямой подстановки $p \rightarrow \delta$.

Перечисленные особенности ВИМ хорошо согласуются с численными методами и микропроцессорной техникой, что позволяет использовать метод для вычисления момента инерции в замкнутом электроприводе по переходным характеристикам.

3. Методика определения момента инерции в замкнутом электроприводе

Определение момента инерции по измеряемым сигналам можно рассмотреть на примере контура скорости привода (рис. 2).

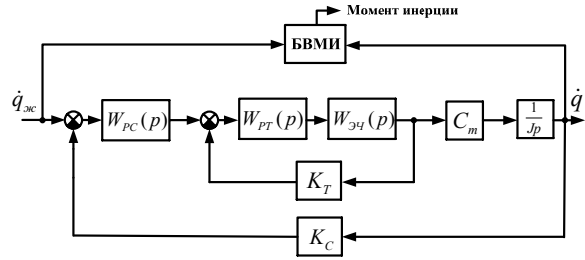


Рис. 2. Структурная схема контура скорости с блоком вычисления момента инерции (БВМИ)

Используя (2), запишем выражение для замкнутой вещественной ПФ контура скорости

$$W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (\dot{q}(t) - \dot{q}(t_1)) \exp(-\delta t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} (\dot{q}_{\text{ж}}(t) - \dot{q}_{\text{ж}}(t_1)) \exp(-\delta t) dt}, \quad (3)$$

где $[t_1, t_2]$ – интервал наблюдения. Выбор узла интерполирования δ основан на решении уравнения [8]

$$W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta) = (0, 1 \dots 0, 2) \cdot W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(0). \quad (4)$$

Уравнение (4) решается численно, и его решение не встречает существенных трудностей. Количество итераций зависит от избранного метода решения. В простейшем случае, когда значение узла δ отыскивается методом половинного деления, общее число итераций не превышает 5–7.

На основе известной формулы перехода [8] запишем выражение для разомкнутой вещественной ПФ контура скорости

$$W_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta) = \frac{W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(p)}{1 - K_C W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(p)} \Big|_{p \rightarrow \delta} = \frac{W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta)}{1 - K_C W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta)}.$$

С другой стороны, для системы (рис. 2) можно записать выражение для разомкнутой вещественной ПФ контура скорости $\bar{W}_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta)$ в виде

$$\begin{aligned} \bar{W}_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta) &= W_{\text{PC}}(p) \cdot W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(p) \cdot C_m \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{p} \Big|_{p \rightarrow \delta} = \\ &= W_{\text{PC}}(\delta) \cdot W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta) \cdot C_m \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{\delta}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta)$ – вещественная ПФ замкнутого контура тока, имеющая вид

$$\begin{aligned} W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta) &= \frac{W_{\text{PT}}(p) W_{\text{ЭЧ}}(p)}{1 + K_T W_{\text{PT}}(p) W_{\text{ЭЧ}}(p)} \Big|_{p \rightarrow \delta} = \\ &= \frac{W_{\text{PT}}(\delta) W_{\text{ЭЧ}}(\delta)}{1 + K_T W_{\text{PT}}(\delta) W_{\text{ЭЧ}}(\delta)}. \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки (5) в (6) и с учетом приближенного равенства $\bar{W}_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta) \cong W_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta)$ получаем выражение, на основе которого определяется момент инерции

$$J \cong \frac{W_{\text{PC}}(\delta) \cdot W_{\text{кв}}^{\text{зам}}(\delta) \cdot C_m}{W_{\text{кв}}^{\text{раз}}(\delta) \cdot \delta}.$$

Это выражение используется для определения момента инерции по конечным временным выборкам сигналов $\dot{q}_ж$ и \dot{q} . Таким образом, на выходе БВМИ имеем значение момента инерции J , используемое в дальнейшем для коррекции настроечных параметров регуляторов с целью улучшения динамической точности системы управления.

4. Численный пример

В качестве исполнительного двигателя возьмем бесколлекторный двигатель постоянного тока БУВП-60. Представим ПФ электрической части $W_{эч}(p)$ в виде двух апериодических звеньев соединенных последовательно, описывающих процессы, протекающие в обмотке двигателя и в трансисторном преобразователе

$$W_{эч}(p) = \frac{K_a}{(T_f p + 1) \cdot (T_a p + 1)},$$

где K_a – коэффициент передачи электрической части привода, T_f и T_a – постоянные времени преобразователя и якорной обмотки двигателя соответственно. Численные значения параметров: $K_a=11$, $T_f=10^{-3}$ с, $T_a=8,75 \cdot 10^{-3}$ с, $C_m=3$ Н·м/А.

Передаточные функции регуляторов тока, скорости и положения имеют следующий вид

$$W_{пр}(p) = \frac{6,453 \cdot 10^{-3} p + 0,866}{1,178 \cdot 10^{-4} p + 1},$$

$$W_{рс}(p) = \frac{40,78 p + 22,072}{p(9,449 \cdot 10^{-3} p + 1)},$$

$$W_{рл}(p) = \frac{15,861 p + 5,373}{2,978 p + 1},$$

и обеспечивают в каждом контуре быстродействие $t_{кр}=0,001$ с, $t_{кс}=0,1$ с, $t_{кл}=0,5$ с соответственно. Коэффициенты обратных связей в каждом контуре принимают значения $K_r=0,895$, $K_c=K_l=1$. Регуляторы синтезированы на номинальный режим работы электропривода при значении момента инерции $J=2$ кг·м², при этом система управления обеспечивает протекание апериодических переходных процессов в контуре положения. В процессе эксплуатации системы момент инерции изменяется в интервале 0,5...10 кг·м². Определение момента инерции идет по отклику системы на ступенчатое воздействие, приходящее на вход контура положения. Время наблюдения не превышает 0,8 с. В качестве метода решения (4) использовался метод половинного деления с погрешностью решения $|\varepsilon| \leq 10^{-2}$. С целью автоматизации расчетов в прикладном пакете MatLab была составлена программа, реализующая описанный метод вычисления момента инерции. На рис. 3 представлены графики, характеризующие зависимости относительной ошибки Δ работы БВМИ и уз-

ла интерполирования δ от действительного значения момента инерции электропривода.

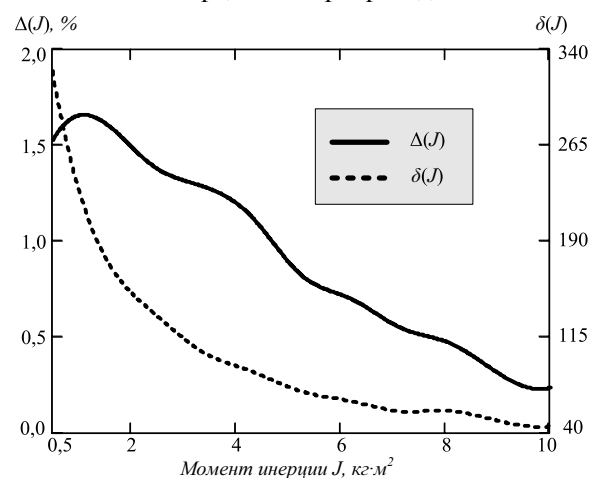


Рис. 3. Зависимости $\Delta(J)$ и $\delta(J)$

Из рис. 3 видно, что для всего диапазона возможных значений момента инерции ошибка определения Δ не превышает 2 %. При этом для интегрирования выражения (3) использовался метод прямоугольников. Если применить более точный метод вычисления определенных интегралов (например, метод трапеций или метод Симпсона), можно достичь лучшего результата.

Зависимость $\delta(J)$ представляет собой совокупность решений (4), полученных для временных выборок сигналов $\dot{q}_ж$, \dot{q} при различном значении параметра J . Из графика следует, что узел интерполирования нелинейно зависит от реального значения момента инерции механической части привода, и применение в данном случае численного метода решения (4) оправдано.

Выводы

Приведена методика определения момента инерции в замкнутом электроприводе с привлечением вещественного интерполяционного метода. Методика отличается простотой и экономичностью в вычислительном плане, поскольку все вычисления проводятся с функциями вещественного аргумента. Расчет осуществляется по временным сигналам произвольной формы с высокой точностью. Рассмотрен пример применения методики, в котором ошибка для анализируемой системы во всем интервале значений момента инерции не превысила 2 %. Предложенный подход позволяет строить самонастраивающиеся системы с коррекцией настроек регуляторов по вычисляемому значению параметра, что в значительной степени способствует стабилизации динамических свойств системы управления электроприводом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сисюк Г.В., Родькин Д.И., Королев Ю.Г. К вопросу об идентификации параметров тиристорных электроприводов постоянного тока на основе моделей энергообразования // Проблемы создания новых машин и технологий: Науч. тр. КГПИ. – Кременчуг, 1999. – Т. 2. – С. 47–50.
2. Родькин Д.И., Хараджян А.А., Михайлов С.В. Диагностика параметров двигателя постоянного тока при испытаниях // Проблемы создания новых машин и технологий: Науч. тр. КГПИ. – Кременчуг, 1998. – Т. 1. – С. 10–13.
3. Орловский И.А. Определение параметров привода постоянного тока в режиме ограничения тока якоря // Электротехника и электроэнергетика. – 2002. – № 1. – С. 63–66.
4. Baruch I.S., Garrido R., Flores J.M. A fuzzy neural recurrent multi-model for systems identification and control // Proc. of European Control Conf. – Porto, 2001. – P. 3540–3545.
5. Хорьков К.А., Хорьков А.К. Электромеханические системы. Элементы канала управления. – Томск: Томский гос. ун-т, 2001. – 396 с.
6. Hewit J.R. Disturbance cancellation control // Proc. of Intern. Conf. on Mechatronics. – Ankara, 1996. – P. 135–143.
7. Hewit J.R., Burdess J.S. An active method for the control of mechanical system in the presence of unmeasurable forcing // Mechanism and Machine Theory. – 1981. – V. 16. – № 5. – P. 535–542.
8. Гончаров В.И. Вещественный интерполяционный метод синтеза систем автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 1995. – 108 с.

Поступила 22.04.2009 г.

УДК 658.512.02

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Т.В. Александрова, Ю.Л. Бикинеева*, Е.И. Громаков, В.М. Павлов, А.М. Малышенко

Институт «Кибернетический центр» ТПУ
 *ЗАО «Томский кабельный завод», г. Томск
 E-mail: mam@tpu.ru

Рассмотрены вопросы программно-алгоритмического построения интегрированной системы управления производством кабельной продукции. Для управления таким производством предложено функциональное и программно-техническое обеспечение автоматизированных рабочих мест и сервисов их информационного обеспечения.

Ключевые слова:

Автоматизированные системы управления, SCADA, MES, кабельное производство, автоматизированное рабочее место, интегрированные системы управления.

Введение

В настоящее время на предприятиях кабельной промышленности задача повышения эффективности производства без интегрированной автоматизации технологических и производственных процессов не может быть решена. В основе такой автоматизации лежат современные информационные технологии (ИТ) – SCADA, MES и ERP, обеспечивающие в реальном масштабе времени (в режиме «on line») автоматизированные рабочие места (АРМ) мастеров кабельного производства, технолога, диспетчера по обслуживанию оборудования и других менеджеров (руководителей) необходимой технологической и производственной информацией, достаточной для принятия решений при централизованном управлении производственным процессом, технологическим оборудованием и решения задач оперативного планирования производства.

Известные решения, в частности, «лоскутная интеграция», реализуемая на основе различных программно-технических систем ИТ-технологий часто сводится к необходимости ввода большого объема данных вручную с использованием консолей или клавиатуры персонального компьютера (ПК). Ми-

нусы такого подхода очевидны: низкая оперативность, высокая вероятность случайных и преднамеренных ошибок. Внедрение интегрированной системы управления (ИСУ) обеспечивает синхронизацию всех жизненно важных бизнес процессов предприятия с использованием современных информационных технологий. В результате интеграции, слияния отдельных подсистем автоматизации в единую систему формируется известный системный эффект синергетики, который и является источником повышения эффективности производства.

Постановка задачи

Для более эффективного ИТ-управления производством кабельной продукции предлагается реализовать программно-аппаратную интеграцию уровней SCADA и MES-систем. При этом на систему SCADA возлагается не столько функция управления технологическим процессом, сколько функции регистрации технологических событий, учета готовой продукции и полуфабрикатов, обработки полученной информации, ее хранения и предоставления данных для электронных документов на АРМ специалистов.