

УДК 004.94+621.3(045)

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-69-78

## Идентификация математической модели электромеханической системы

И.С. Полющенко

Рассмотрено применение метода вещественной интерполяции для идентификации линейной системы, в частности, электромеханической системы, позволяющего идентифицировать передаточную функцию по переходным процессам неустановившегося движения системы. При этом осуществляется аппроксимация испытательных сигналов, представленных в виде массивов отсчетов во временной области и вычисление значений передаточной функции в вещественных точках — узлах интерполяции. Приведено математическое описание метода идентификации, заключающееся в вычислении свертки испытательных сигналов и весовых функций, а также требующее решения системы линейных алгебраических уравнений. Использовано временное преобразование испытательных сигналов для приведения их длительности к нормированному времени. Это позволяет выделять в идентифицированной передаточной функции наиболее значимые коэффициенты, существенно влияющие на динамику, а также наименее значимые коэффициенты и не учитывать их в математической модели для ее упрощения.

Указаны требования к испытательным сигналам и дискретности их представления во временной области и к узлам интерполяции. В системе Matlab разработано программное обеспечение для реализации метода идентификации, которое может быть использовано в исследовательских приложениях на базе персонального компьютера или в микропроцессорных системах управления. Указана возможность реализации метода вещественной интерполяции на базе программно-аппаратных средств микропроцессорной техники. Для этого разработана экспериментальная система управления электропривода, осуществляющая формирование задающих воздействий, измерение испытательных сигналов и вычисления по методу идентификации. Программное обеспечение для идентификации создано с использованием средств модельно-ориентированного программирования и включено в состав программного обеспечения системы управления электропривода. При исследовании осуществлены модельные и натурные эксперименты по идентификации элементов электромеханической системы.

*Ключевые слова:* идентификация, вещественная интерполяция, передаточная функция, динамическая и электромеханическая системы.

*Для цитирования:* Полющенко И.С. Идентификация математической модели электромеханической системы // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 69—78. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-69-78.

## Identifying an Electromechanical System's Mathematical Model

I.S. Polyushchenkov

The article considers application of real interpolation method for identifying a linear dynamic system (specifically, an electromechanical system) which allows the system transfer function to be identified from the system unsteady motion transients. In so doing, the test signals presented in the form of readout arrays in the time domain are approximated, and the transfer function coefficients are calculated at real points (interpolation nodes). The identification method mathematical description is presented which consists in calculating the test signals convolution and weight functions and involves solution of a system of linear algebraic equations. The time transformation of test signals is used to bring their duration to the normalized time. By using this approach, the most significant coefficients of the identified transfer function that have a significant effect on the system dynamic behavior are determined, as well as the least significant coefficients which can be excluded from the mathematical model for simplifying it.

The requirements for test signals, for the quantization of representing them in the time domain and for the interpolation nodes are specified. A software for implementing the identification method has been developed in the Matlab system environment which can be used in research applications on a personal computer or in microprocessor control systems. The possibility of implementing the real interpolation method by means of microprocessor software and hardware facilities is pointed out. To this end, an experimental electric drive control system has been developed, which involves means for generating reference signals, for measuring test signals and for carrying out computations according to the identification method. The software for performing identification tasks has been developed using model-oriented programming techniques and integrated in the electric drive control system software. The study activities included model and full-scale experiments on identifying the electromechanical system elements.

*Key words:* identification, real interpolation, transfer function, dynamic system, electromechanical system.

*For citation:* Polyushchenkov I.S. Identifying an Electromechanical System's Mathematical Model. MPEI Vestnik. 2019;1:69—78. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-69-78.

## Введение

Решение задачи идентификации — один из этапов анализа и синтеза динамических систем с помощью математических моделей. Оно применяется в системах автоматического управления, информационно-измерительной технике и исследовательских приложениях. Известны различные методы идентификации, основанные на анализе реакции динамической системы на испытательный сигнал различной формы [1 — 6]. Для решения задачи идентификации на основе некоторой априорной информации требуется получить математическую модель, соответствующую объекту исследования по критерию точности. При параметрической идентификации можно выбрать подходящую модель объекта исследования из числа известных, а затем идентифицировать ее параметры. Если структура модели заранее неизвестна, то возникает задача структурной идентификации, требующая определения структуры модели, при которой она наиболее полно соответствует объекту исследования.

С точки зрения удобства практического применения, наибольшее значение имеют методы идентификации, удовлетворяющие ряду требований, к которым следует отнести минимальное количество испытательных движений, использование рабочих движений в качестве испытательных, единый алгоритм идентификации всех коэффициентов модели, удобство формирования и характеристики испытательных сигналов [7]. Кроме того, важным условием считается возможность автоматизации алгоритма при использовании численных методов расчета, реализуемых программно-аппаратными средствами вычислительной техники. Этим требованиям в полной мере отвечает метод вещественной интерполяции, основанный на анализе неустановившегося движения — реакции системы на скачкообразный сигнал [8 — 11]. Однако, ему, как и другим методам, присущи и недостатки. Согласно [8 — 11] он требует итеративного определения структуры модели, наилучшей по критерию точности, что усложняет реализацию. Для частотных методов идентификации [1, 5, 6] необходимо использование гармонических или полигармонических испытательных сигналов, которые, как правило, не характерны для рабочих движений систем регулирования и достаточно сложны для формирования. Кроме того, в частотных методах периодические испытательные сигналы продолжительны по времени, а также нужно ожидать окончания свободной составляющей движения и установления вынужденных колебаний.

Целями работы являются разработка рекомендаций по модернизации метода вещественной интерполяции применительно к задачам идентификации электромеханических систем и исследование возможности практической реализации этой методологии в микропроцессорной системе управления электропривода.

## Анализ особенностей применения метода вещественной интерполяции и его модернизация

Динамические процессы, протекающие в электромеханических системах, основаны на различных законах физики и с учетом допущений описываются системой математических уравнений — математической моделью. В соответствии с положениями теории автоматического управления, в качестве модели используется передаточная функция  $W(p)$  в операторной форме, устанавливающая связь между задающим воздействием  $x(t)$  и целевой координатой движения  $y(t)$ :

$$W(p) = \frac{\int_0^{\infty} e^{-pt} y(t) dt}{\int_0^{\infty} e^{-pt} x(t) dt} = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (1)$$

где  $X(p)$ ,  $Y(p)$  — изображения входных сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$ ;  $p = \delta + j\Omega$  — оператор Лапласа.

Как правило, передаточная функция выражается в дробно-рациональной форме с полиномами  $A_m(p)$  и  $B_n(p)$  порядков  $m$  и  $n$ :

$$W(p) = \frac{A_m(p)}{B_n(p)} = \frac{\sum_{i=0}^m a_i p^i}{\sum_{j=0}^n b_j p^j}. \quad (2)$$

Условие физической реализуемости динамической системы —  $m < n$ . Соотношение (1) указывает очевидный способ идентификации — вычисление преобразования Лапласа для входного  $x(t)$  и выходного  $y(t)$  сигналов. Если аналитическое описание сигналов отсутствует, и для этого используются массивы дискретных отсчетов во временной области  $\{x[t_r]\}$  и  $\{y[t_r]\}$ , то следует использовать численные методы расчета.

Последовательности сбора и обработки информации при идентификации иллюстрирует функциональная схема, показанная на рис. 1.

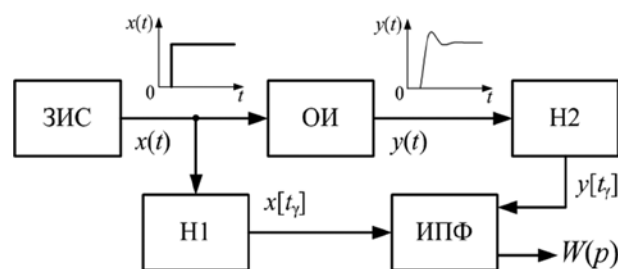


Рис. 1. Функциональная схема устройства для идентификации по методу вещественной интерполяции:

ЗИС — задатчик испытательного сигнала; Н1, Н2 — накопители для дискретизации и захвата входного и выходного сигналов объекта исследования ОИ; ИПФ — идентификатор передаточной функции

Сложность для применения численных методов расчета по (1) создается из-за наличия мнимой составляющей  $j\Omega$  в комплексной переменной  $p$ . Устранить указанную проблему позволяет использование вещественных изображений функций времени, у которых ее нет [10]. Переход от операторной формы передаточной функции к вещественной выполним при формальной замене оператора  $p$  на вещественную переменную  $\delta \in [0, \infty]$ . Математическая трактовка вещественного изображения состоит в проекции комплексной плоскости на вещественную положительную полуось. Вещественные изображения положены в основу метода вещественной интерполяции. Он позволяет вычислить значения передаточной функции в вещественных точках  $\{\delta_k\}$ , называемых узлами интерполяции. Если  $\{\delta_k\}$  подставить в (1), (2) и приравнять их, то получится система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} B_n(\delta_1)W(\delta_1) - A_m(\delta_1) = 0; \\ B_n(\delta_2)W(\delta_2) - A_m(\delta_2) = 0; \\ \dots\dots\dots \\ B_n(\delta_k)W(\delta_k) - A_m(\delta_k) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь

$$A_m(\delta_k) = \sum_{i=0}^m a_i \delta_k^i; \quad B_n(\delta_k) = \sum_{j=0}^n b_j \delta_k^j;$$

$$W(\delta_k) = \frac{\int_0^{\infty} e^{-\delta_k t} y(t) dt}{\int_0^{\infty} e^{-\delta_k t} x(t) dt}.$$

Система уравнений (3) устанавливает связь коэффициентов  $a_i$  и  $b_j$  со значениями передаточной функции в узлах интерполяции  $W(\delta_k)$ . Решение (3) позволяет получить численные значения коэффициентов  $a_i$  и  $b_j$ , то есть аппроксимировать динамическую систему моделью вида (2).

Очевидно, что число узлов интерполяции  $k$  зависит от числа коэффициентов в модели (2) и равно размерности системы (3), которая определяется следующим образом, если задать  $b_0 = 1$ :

$$k = m + n + 1.$$

Кроме интервала между отсчетами в выборках сигналов  $x[t_\gamma]$  и  $y[t_\gamma]$  на точность идентификации существенно влияет и выбор узлов интерполяции. В настоящее время не существует способа выбора узлов, наилучшим образом соответствующего критерию точности [10]. Удобно использовать наиболее простой вариант — равномерное распределение узлов интерполяции  $\{\delta_k\}$ , а интервал их значений при этом должен охватывать область существенных изменений аппроксимируемых сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$  на интервале наблюдения. В ходе исследования принято следующее

требование к узлам интерполяции и соответствующим им весовым функциям  $g_k(t)$ :

$$\lim_{t \rightarrow T} g_k(t) \rightarrow 0; \quad g_k(t) = e^{-\delta_k t}, \quad (4)$$

где  $T$  — интервал наблюдения сигналов, равный длительности переходного процесса.

По методу вещественной интерполяции кроме переходной функции, а именно, реакции на скачкообразный испытательный сигнал, могут быть использованы сигналы  $x(t)$  и  $y(t)$ , удовлетворяющие следующим условиям:

$$\lim_{t \rightarrow T} x(t) \rightarrow \text{const}; \quad \lim_{t \rightarrow T} y(t) \rightarrow \text{const}. \quad (5)$$

Согласно (4), (5) выбор узлов  $\{\delta_k\}$  в каждом конкретном случае следует проводить в зависимости от длительности  $T$  выходного сигнала  $y(t)$ , зависящей от динамических свойств объекта.

На рисунке 2 представлены временные диаграммы сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  и весовых функций  $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ , которые соответствуют условиям (4), (5).

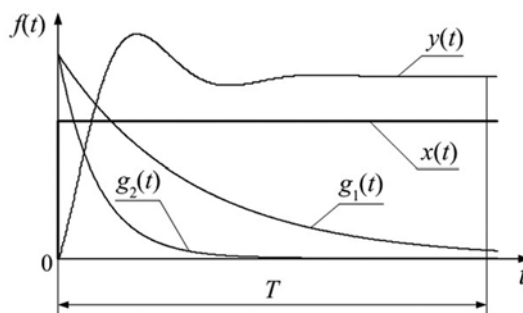


Рис. 2. Сопоставление входного и выходного сигналов объекта исследования с весовыми функциями

При численном расчете вещественных изображений  $W(\delta_k)$  для вычисления свертки сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  с весовыми функциями  $g_k(t)$  в системе уравнений (3) может быть использована сумма ряда:

$$X(\delta_k) = \int_0^T e^{-\delta_k t} x(t) dt \approx \sum_{\gamma=0}^N g_k[t_\gamma] x[t_\gamma];$$

$$Y(\delta_k) = \int_0^T e^{-\delta_k t} y(t) dt \approx \sum_{\gamma=0}^N g_k[t_\gamma] y[t_\gamma], \quad (6)$$

где  $N$  — число отсчетов сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  на интервале наблюдения  $T$ ;  $\gamma$  — порядковый номер отсчета сигнала,  $0 \leq \gamma \leq N$ ;  $t_\gamma$  — отсчеты времени.

Выполнение условий (4), (5) необходимо, чтобы сумма ряда в (6) была конечной на интервале наблюдения  $T$ .

Выбор вида модели (2), а именно порядков  $m$  и  $n$  полиномов  $A_m(p)$  и  $B_n(p)$ , зависит от априорной информации об объекте исследования. Если значения  $m$  и  $n$  неизвестны, то следует выполнить структурную идентификацию таким образом, чтобы модель наиболее

полно соответствовала объекту, но не была при этом слишком сложной.

Согласно методикам вещественной интерполяции, описанным в [8 — 11], структурная идентификация, т. е. определение вида модели (2), который соответствует объекту, осуществляется итеративно. Первоначально задается простейший вид модели (2) с минимальными порядками  $m$  и  $n$ , для которой по реакции объекта на скачкообразный сигнал осуществляется идентификация по системе (3). Затем нужно рассчитать модельную переходную функцию и сравнить ее с экспериментальной переходной функцией объекта. Критерием соответствия объекта и модели, полученной при идентификации, является совпадение указанных функций. При существенном их отличии в модели итеративно увеличивают порядки  $m$  и  $n$ , и процедура идентификации повторяется, пока не будет достигнуто требуемое соответствие и получена модель, наилучшим образом соответствующая объекту. Очевидно, что процедура оценки соответствия модели и объекта по [8 — 11] достаточно сложна и требует несколько итераций с большим объемом вычислений в каждой из них. Для устранения указанного недостатка метод вещественной интерполяции был модернизирован путем использования нормирования сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  по времени, что основано на следующих положениях.

Коэффициенты  $a_i$ ,  $b_j$  передаточной функции вида (2) согласно принципам модального управления [12] могут быть представлены в следующем виде:

$$a_i = \frac{a_{\tau i}}{\Omega_\sigma^i}; \quad b_j = \frac{b_{\tau j}}{\Omega_\sigma^j}; \quad \Omega_\sigma = \frac{\tau}{t}, \quad (7)$$

где  $\Omega_\sigma$  — среднегеометрический корень (базовая частота);  $t$  — действительное время;  $\tau$  — нормированное время.

Нормированная передаточная функция с коэффициентами  $a_{\tau i}$ ,  $b_{\tau j}$ , описывающая процессы, протекающие в нормированном времени  $\tau$ , имеет вид:

$$W_\tau(s) = \frac{A_{\tau m}(s)}{B_{\tau n}(s)} = \frac{\sum_{i=0}^m a_{\tau i} s^i}{\sum_{j=0}^n b_{\tau j} s^j}; \quad s = \frac{p}{\Omega_\sigma} = \frac{d}{d\tau}. \quad (8)$$

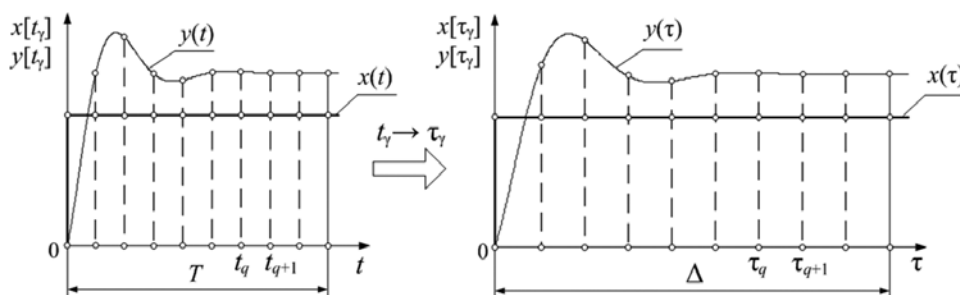


Рис. 3. Временное преобразование испытательных сигналов

Базовая частота  $\Omega_\sigma$  — мера быстродействия динамической системы, в том числе и длительности переходного процесса:

$$\Omega_\sigma = \Delta/T, \quad (9)$$

где  $\Delta$  — нормированная длительность переходного процесса.

Если у передаточной функции вида (2)  $\Omega_\sigma = 1 \text{ с}^{-1}$ , то она совпадает с нормированной передаточной функцией (8), а именно:  $a_i = a_{\tau i}$ ;  $b_j = b_{\tau j}$ ;  $s = p$ ;  $T = \Delta$ .

Временные диаграммы, показанные на рис. 3, иллюстрируют временное преобразование сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  длительности  $T$ , которые приводятся к сигналам  $x(\tau)$ ,  $y(\tau)$  нормированной длительности  $\Delta$ . Очевидно, что  $y[t_q] = y[\tau_q]$  и  $x[t_{q+1}] = x[\tau_{q+1}]$ .

Переходы  $t \rightarrow \tau$ ,  $y[t_q] \rightarrow y[\tau_q]$  и  $x[t_{q+1}] \rightarrow x[\tau_{q+1}]$  эквивалентны масштабированию сигналов по времени:

$$\Omega_\sigma = \frac{\Delta}{T} = \frac{\tau_{q+1} - \tau_q}{t_{q+1} - t_q}; \quad \tau_q = t_q \Omega_\sigma.$$

При преобразовании функций  $g_k(t) \rightarrow g_k(\tau)$  происходит масштабирование узлов интерполяции в зависимости от длительности переходного процесса  $T$ :

$$\delta_{\tau k} = \frac{\delta_k}{\Omega_\sigma} = \delta_k \frac{T}{\Delta}.$$

Компьютерное моделирование динамических систем в Matlab/Simulink показало, что в передаточной функции нормированного вида (8) у наиболее значимых для динамики коэффициентов числовые значения примерно одного порядка. Это же относится и к передаточным функциям вида (2) при  $\Omega_\sigma = 1 \text{ с}^{-1}$ . Примером этого могут служить нормированные полиномы [12], у которых все коэффициенты  $a_{\tau i}$  и  $b_{\tau j}$  близки по величине. Следовательно, для нормированных передаточных функций и при базовой частоте  $\Omega_\sigma = 1 \text{ с}^{-1}$  критерием значимости коэффициентов  $a_{\tau i}$  и  $b_{\tau j}$  модели будет соотношение их величин. Полиномы  $A_m(p)$  и  $B_n(p)$  из (2) в общем случае при базовой частоте  $\Omega_\sigma \gg 1 \text{ с}^{-1}$  или  $\Omega_\sigma \ll 1 \text{ с}^{-1}$  таким свойством не обладают. Указанная закономерность для оценки значимости коэффициентов использована при модернизации метода вещественной интерполяции для уменьшения объема вычислений,

чтобы идентифицировать передаточную функцию, соответствующую объекту, за одну итерацию.

Для расчета нормированной длительности  $\Delta$  переходного процесса можно воспользоваться соотношением на основе формулы [13], принимая для нормированной передаточной функции  $\Omega_0 = 1 \text{ c}^{-1}$ , так как  $W_\tau(s)$  и  $W(p)$ , имеющая базовую частоту  $\Omega_0 = 1 \text{ c}^{-1}$ , совпадают:

$$\Delta \geq 2 \frac{n + 2\sqrt{n-1}}{\Omega_0}$$

При  $n = 4 \dots 5$  нормированная длительность сигналов и интервал их наблюдения  $\Delta = 15 \dots 20$ . При известной величине  $\Delta$  базовая частота  $\Omega_0$  для исследуемой динамической системы рассчитывается по (9) после изменения длительности переходного процесса  $T$ .

Согласно модернизированному методу идентификации, временное преобразование  $t \rightarrow \tau$  следует применить ко всем сигналам и функциям, входящим в (3). Объект исследования аппроксимируется по системе (3) априорной нормированной моделью вида (8) с заведомо большими порядками  $m$  и  $n$  полиномов  $A_{tm}(s)$  и  $B_{tn}(s)$ , чем в его предполагаемой передаточной функции. В связи с этим после решения системы (3) требуется оценить значимость коэффициентов  $a_{ti}$  и  $b_{vj}$ . Наличие незначимых коэффициентов характерно для старших степеней  $s$  в (8), а, следовательно, и старших степеней  $p$  в (2), что связано с неточностью измерения и дискретностью описания сигналов, а также использованием численных методов расчета. Значимые же коэффициенты характерны для младших степеней  $s$  и  $p$ . Следует отметить, что приведение весовых функций  $g_k(t)$  к виду  $g_k(\tau)$  позволяет использовать единые наборы узлов интерполяции  $\{\delta_{ik}\}$  для аппроксимации сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$  различной длительности  $T$ , которая приводится к нормированной величине  $\Delta$ .

Ранее было отмечено, что критерием значимости коэффициентов модели (8) является соотношение их величин, следовательно, среди рассчитанных по (3) коэффициентов  $a_{ti}$ ,  $b_{vj}$  требуется найти максимальные по величине  $a_{t\max}$  и  $b_{v\max}$ . Принято условие, что значимые коэффициенты из  $a_{ti}$ ,  $b_{vj}$  отличаются от  $a_{t\max}$  и  $b_{v\max}$  не более чем в десять раз, а коэффициенты, не соответствующие этому условию, считаются незначимыми и приравниваются нулю:

$$\begin{aligned} \text{если } \frac{b_{v\max}}{b_{vj}} \leq 10, \text{ то } b_{vj} &= b_{vj}; \\ \text{если } \frac{b_{v\max}}{b_{vj}} > 10, \text{ то } b_{vj} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

По (10) требуется последовательно сравнивать  $b_{v\max}$  с коэффициентами  $b_{vj}$ , начиная со старших степеней  $s$ , до обнаружения первого значимого. Коэффициенты младше первого обнаруженного значимого коэффициента считаются незначимыми. Аналогично проверяются

коэффициенты  $a_{ti}$ . Затем по (7) рассчитывают  $a_i$  и  $b_j$ , соответствующие действительному времени  $t$ .

Проиллюстрируем оценку значимости коэффициентов численным примером. Допустим, в результате идентификации динамической системы с базовой частотой  $\Omega_0 = 0,1 \text{ c}^{-1}$ , рассчитанной по (9), была получена следующая передаточная функция нормированного вида (8):

$$W_\tau(s) = \frac{1}{0,005s^4 + 0,08s^3 + 0,9s^2 + 1,2s + 1} \quad (11)$$

В ней коэффициенты  $b_{t4}$  и  $b_{t3}$  значительно меньше остальных, и на основании критерия (10) их можно принять равными нулю. При моделировании динамического звена (11) видно, что наличие или отсутствие данных коэффициентов мало влияет на вид переходной функции. Если же по (7) перейти к действительному времени  $\tau \rightarrow t$  и  $W_\tau(s) \rightarrow W(p)$ , учитывая, что  $\Omega_0 = 0,1 \text{ c}^{-1}$ , то будет получена передаточная функция вида (2):

$$W(p) = \frac{1}{50p^4 + 80p^3 + 90p^2 + 12p + 1} \quad (12)$$

Коэффициенты  $b_4$  и  $b_3$  в (12), так же как и  $b_{t4}$  и  $b_{t3}$  в (11), мало влияют на динамику звена, но по величине они соизмеримы с другими коэффициентами и нельзя делать вывод об их значимости только лишь по величине. Аналогичный пример можно привести и для  $\Omega_0 > 1 \text{ c}^{-1}$ .

Описанная модернизация метода вещественной интерполяции значительно упрощает структурную идентификацию по сравнению с [8 — 11], поскольку для определения вида модели (2), соответствующего объекту исследования, требуется одна итерация. Для сравнения, в исходном методе при каждой из итераций требуется решить систему (3).

### Экспериментальное исследование

При практической реализации метода вещественной интерполяции и его исследовании в системе компьютерной математики Matlab составлено программное обеспечение в виде  $m$ -файла, проведены вычислительные и натурные эксперименты. В системе Matlab/Simulink использовали модели динамических звеньев и имитационные модели замкнутых систем электропривода с заранее известными параметрами. На рисунке 4 показана модель для вычислительных экспериментов в Matlab.

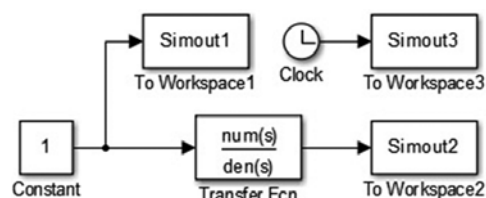


Рис. 4. Модель для вычислительных экспериментов

В ней элементы *Simout1* — *Simout3* накапливают отсчеты входного, выходного сигналов и отсчетов времени. Затем в Matlab с использованием программной реализации метода по этим данным выполняют идентификацию системы, которая представлена блоком *Transfer Fcn*. В натурных экспериментах метод вещественной интерполяции использован при идентификации параметров *RLC*-цепи по переходному процессу заряда конденсатора, а также при идентификации якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения и замкнутого контура регулирования тока указанного электрического двигателя. Для проведения натурных экспериментов и оценки возможности реализации метода на базе программно-аппаратных средств микропроцессорной техники взята система управления ранее разработанного электропривода [14] на основе микроконтроллера STM32. Данный электропривод предназначен для работы с электрическими двигателями различных типов, в том числе с электрическим двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Также в системе управления электропривода предусмотрен обмен информацией по последовательному интерфейсу с персональным компьютером [15]. Применительно к задаче идентификации система управления передает измеренные значения испытательных сигналов и результаты идентификации. Программное обеспечение электропривода разработано с использованием средств модельно-ориентированного программирования — библиотеки *Waijung Blockset* [14, 15] системы Matlab. Программа для идентификации интегрирована в программное обеспечение электропривода с помощью средств модельно-ориентированного программирования.

Якорная цепь электрического двигателя запитана от мостового транзисторного преобразователя, схема которого дана на рис. 5, а.

Частота широтно-импульсной модуляции напряжения (ШИМ) составляет 40 кГц, и пульсации тока

сглажены индуктивностью якорной цепи. Поэтому модулированное напряжение силового преобразователя по действию на якорную цепь эквивалентно постоянному напряжению, величина которого равна среднему значению модулированного напряжения. Подсистема программного обеспечения для управления силовым преобразователем (СП) изображена на рис. 5, б. В ней использован генератор ШИМ *Basic PWM* на базе таймера, а также цифровые выходы микроконтроллера *PC6* и *PC7* для задания полярности напряжения. Ток якорной цепи измеряют с помощью датчика тока *DT* (см. рис. 5, а) и преобразуют в цифровой код аналого-цифровым преобразователем (АЦП) микроконтроллера.

На рисунке 6 показана подсистема программного обеспечения для измерения тока. Чтобы обеспечить постоянный интервал повторения, опрос аналогового входа *AN1* блока *Regular ADC* тактируется таймером (блок *Timer IRQ*). Блок пользовательской функции *Basic Custom Code* накапливает отсчеты тока и их обработку.

На рисунке 7, а изображена экспериментальная осциллограмма тока переходного процесса при скачкообразном приложении напряжения к якорной цепи электрического двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Она построена по отсчетам тока, измеренным АЦП микроконтроллера. При снятии осциллограммы обмотка возбуждения отключена.

При описании динамических процессов якорную цепь можно считать *RL*-цепью с типовой математической моделью вида [12]:

$$W_{\text{я}}(p) = \frac{I_{\text{я}}}{U_{\text{я}}} = \frac{1}{R_{\text{я}} p + 1}; \quad T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (13)$$

где  $R_{\text{я}}$ ,  $L_{\text{я}}$ ,  $T_{\text{я}}$  — активное сопротивление, индуктивность и постоянная времени якорной цепи.

Однако вид этой модели при идентификации считается неизвестным, и для аппроксимации была использована заведомо более сложная модель следующего вида:

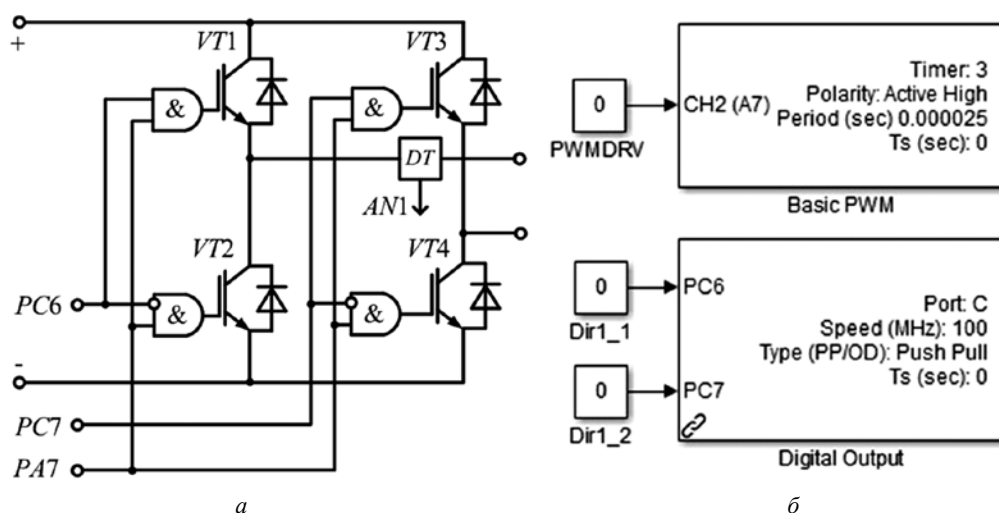


Рис. 5. Силовой преобразователь:  
а — схема; б — подсистема управления

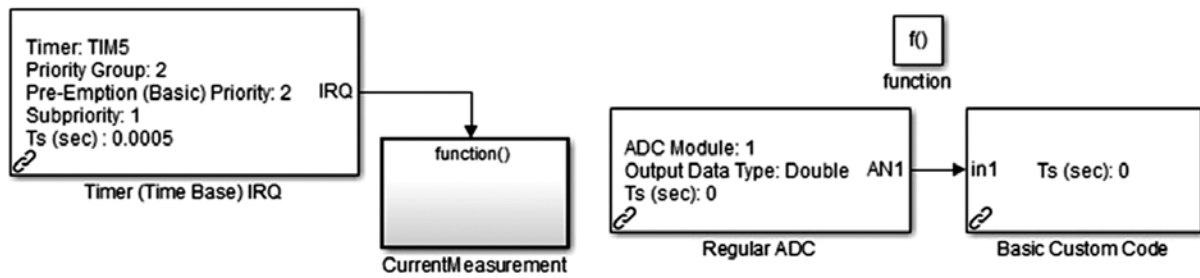


Рис. 6. Подсистема для измерения тока якорной цепи

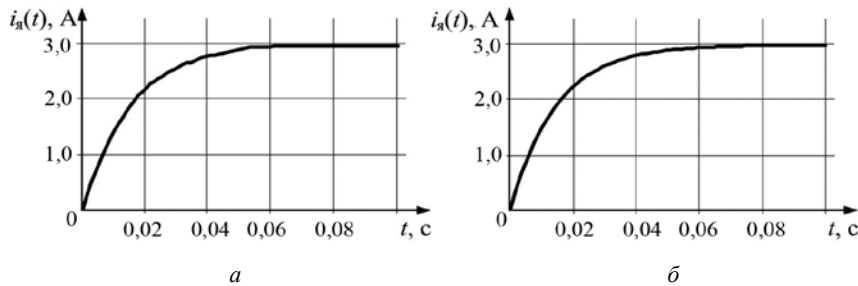


Рис. 7. Экспериментальная (а) и модельная (б) осциллограммы переходного процесса при скачкообразном приложении напряжения к якорной цепи

$$W^*(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (14)$$

В результате идентификации получена модель, являющаяся апериодическим звеном, что соответствует модели (13) с базовой частотой  $\Omega_0 = 166 \text{ с}^{-1}$ :

$$W_{\text{я}}^* = \frac{0,417}{0,0141p + 1}; \quad T_{\text{я}} = 0,0141 \text{ с}; \quad (15)$$

$$R_{\text{я}} = 2,39 \text{ Ом}; \quad L_{\text{я}} = 33,6 \text{ мГн}.$$

По полученной модели (15) в Matlab рассчитан переходной процесс при обработке скачка задающего воздействия, представленный на рис. 7, б. Модельный переходной процесс в целом совпадает с экспериментальной осциллограммой (рис. 7, а) по установившемуся значению и темпу нарастания до него. Затем по (15) выполнена настройка контура регулирования тока таким образом, чтобы пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором тока РТ компенсировать инерционность якорной цепи и обеспечить быстрое затухание переходного процесса. На рисунке 8 показана структурная схема замкнутого контура регулирования тока и его программная реализация с применением средств модельно-ориентированного программирования. В качестве регулятора тока использован элемент *Discrete PID Controller* из библиотеки Simulink. Пользовательская функция *Basic Custom Code 1* на языке С осуществляет обратную связь по току, а пользовательская функция *Basic Custom Code 2* вычисляет сигналы управления преобразователем *PWM DRV*, *Dir1\_1* и *Dir1\_2*, указанные на рис. 5, б, в зависимости от величины и знака выходного сигнала регулятора тока.

Также в этой функции предусмотрен программный фильтр в форме апериодического звена, чтобы повысить помехозащищенность контура. Влияние данного фильтра обуславливает наличие постоянной времени  $T_{\text{н}} \approx 0,01 \text{ с}$  у силового преобразователя в структурной схеме на рис. 8, а. На рис. 9, а дана экспериментальная осциллограмма отработки замкнутым контуром тока скачка задающего воздействия.

При идентификации указанный контур был аппроксимирован моделью вида (14), в результате чего получена следующая модель с базовой частотой  $\Omega_0 = 100 \text{ с}^{-1}$ :

$$W_{\text{крг}}^*(p) = \frac{I_{\text{я}}}{U_{\text{ст}}} = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} = \frac{0,988}{0,00011p^2 + 0,011p + 1}. \quad (16)$$

Полученная модель (13) является колебательным звеном второго порядка, что соответствует структурной схеме, показанной на рис. 7, а при компенсации инерционности якорной цепи регулятором тока. При расчете переходного процесса отработки скачка задающего воздействия по (13) получен график, изображенный на рис. 9, б. Он совпадает с экспериментальной осциллограммой по длительности, установившемуся значению, перерегулированию и колебательности.

Сопоставление динамических свойств объектов исследования и моделей, полученных при их идентификации, показывает, что точность идентификации зависит от точности описания (дискретности) входного и выходного сигналов, а также выбора узлов интерполяции.

В результате вычислительных и натуральных экспериментов исследование метода идентификации на основе

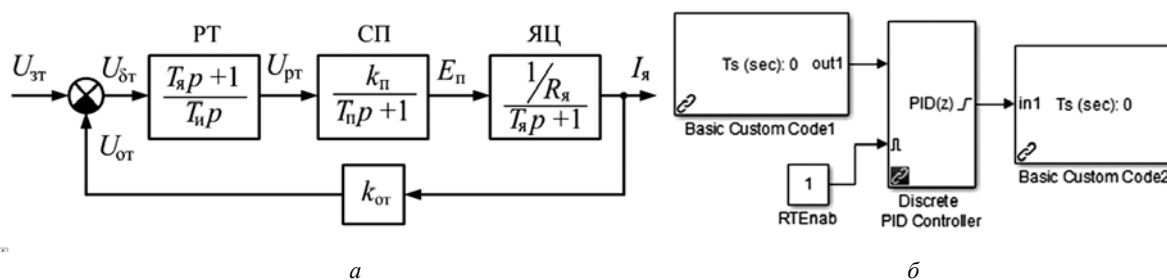


Рис. 8. Контур регулирования тока:

*a* — структурная схема; *б* — реализация средствами модельно-ориентированного программирования

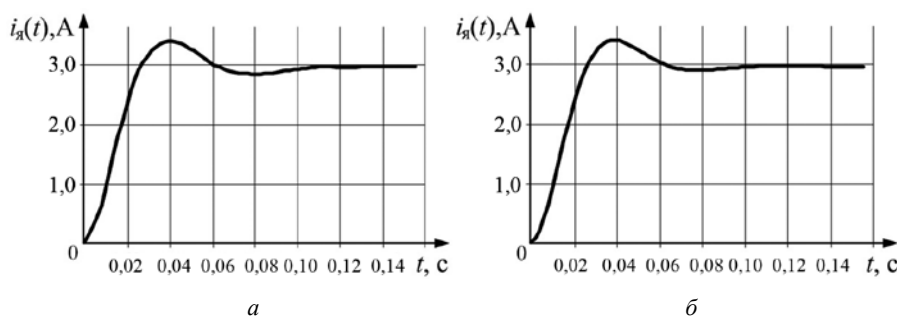


Рис. 9. Экспериментальная (*a*) и модельная (*б*) осциллограммы переходного процесса при обработке контуром регулирования тока скачка задающего сигнала

вещественной интерполяции показало, что при недостаточной точности описания входных и выходных сигналов во временной области и их искажении точность идентификации снижается. Проявлением снижения точности идентификации считается появление в идентифицированных передаточных функциях ненулевых коэффициентов при старших степенях оператора  $p$ , которые не соответствуют физической реализации объекта исследования и не являются значимыми. Однако предложенная модернизация метода, касающаяся оценки идентифицированной модели, позволила исключить из нее незначимые коэффициенты. Это доказывается тем, что идентифицированные передаточные функции (15), (16) соответствуют типовым математическим моделям анализируемых процессов, хотя при идентификации они аппроксимировались более сложной моделью вида (14). Для упрощения указанной модели (в отличие от исходного метода) достаточно одной итерации.

При постановке эксперимента было определено примерное количество отсчетов  $N$  во временной области при описании входного и выходного сигналов  $x(t)$

### Литература

1. Дейч А.М. Идентификация динамических объектов. М.: Энергия, 1979.
2. Нивин А.Е., Саушев А.В., Шошмин В.А. Идентификация системы управления электропривода на ос-

и  $y(t)$  для соответствия модели и объекта. Приемлемая близость модельных и экспериментальных переходных процессов по длительности, установившемуся значению, перерегулированию и колебательности достигнута при представлении входного и выходного сигналов в виде массивов из  $N = 200 \dots 220$  отсчетов во временной области. С ростом колебательности выходного сигнала требуется увеличить число отсчетов для его описания.

### Заключение

Предложена модернизация известного метода вещественной интерполяции, а именно, использование временного преобразования испытательных сигналов и оценка значимости коэффициентов модели, позволяющие упростить процесс идентификации при снижении объема необходимых вычислений.

Методика идентификации реализована с помощью программно-аппаратных средств микропроцессорной системы управления электропривода постоянного тока, а результат идентификации применен при ее настройке на заданные динамические свойства.

### References

1. Deych A.M. Identifikatsiya Dinamicheskikh Ob'ektov. M.: Energiya, 1979. (in Russian).
2. Nivin A.E., Saushev A.V., Shoshmin V.A. Identifikatsiya Sistemy Upravleniya Elektroprivoda na Osno-



нове функций Лагерра // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 2 (18). С. 46—50.

3. **Саушев А.В., Троян Д.И.** Идентификация электроприводов портовых перегрузочных машин // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 5 (33). С. 169—183.

4. **Павлов Ю.Н., Лапин Д.В., Тихомирова Е.А., Шавырин И.Б.** Метод повышения точности идентификации при экспериментальных испытаниях динамических объектов // Наука и Образование. 2015. № 9. С. 215—224.

5. **Дилигенская А.Н.** Идентификация объектов управления. Самара: Изд-во Самарского гос. техн. ун-та, 2009.

6. **Спасибов В.М., Каменских И.А., Ведерников Ю.А.** Частотные и статистические методы идентификации систем управления. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального ун-та, 2016.

7. **Терехин А.А., Даденков Д.А.** Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода // Вестник Пермского национал. исследовательского политехн. ун-та. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2017. № 2. С. 55—66.

8. **Алексеев А.С., Замятин С.В., Суходоев М.С., Пушкарев М.В.** Получение математического описания динамических объектов по экспериментальным данным на основе вещественного интерполяционного метода // Научный вестник Новосибирского гос. техн. ун-та. 2011. № 2. С. 73—82.

9. **Рудницкий В.А., Алексеев А.С., Курганкин В.В.** Идентификация объектов управления в форме дискретных передаточных функций на основе вещественного интерполяционного метода // Известия Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 320. № 5. С. 89—94.

10. **Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А.** Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009.

11. **Курганкин В.В., Замятин С.В., Алексеев А.С.** Применение встраиваемых систем управления для решения задачи идентификации // Известия Томского политехн. ун-та. 2011. № 5. С. 39—42.

12. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005.

13. **Иванков В.А., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В., Красильникъянц Е.В.** Модальное управление взаимосвязанными электроприводами с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах // Вестник ИГЭУ. 2006. № 3. С. 43—48.

14. **Полющенко И.С.** Разработка системы управления электропривода на основе метода модельно-ориентированного программирования // Вестник МЭИ. 2016. № 6. С. 87—95.

Funktsiy Lagerra. Vestnik Gos. Un-ta Morskogo i Rechnogo Flota im. Admirala S.O. Makarova. 2013;2 (18):46—50. (in Russian).

3. **Saushev A.V., Troyan D.I.** Identifikatsiya Elektropriwodov Portovykh Peregruzochnykh Mashin. Vestnik Gos. Un-ta Morskogo i Rechnogo Flota im. admirala S.O. Makarova. 2015;5 (33):169—183. (in Russian).

4. **Pavlov Yu.N., Lapin D.V., Tikhomirova E.A., Shavyrin I.B.** Metod Povysheniya Tochnosti Identifikatsii pri Eksperimental'nykh Ispytaniyakh Dinamicheskikh Ob'ektov. Nauka i Obrazovanie. 2015;9:215—224. (in Russian).

5. **Dilignenskaya A.N.** Identifikatsiya Ob'ektov Upravleniya. Samara: Izd-vo Samarskogo Gos. Tekhn. Un-ta, 2009. (in Russian).

6. **Spasibov V.M., Kamenskikh I.A., Vedernikov Yu.A.** Chastotnye i Statisticheskie Metody Identifikatsii Sistem Upravleniya. Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo Industrial'nogo Un-ta, 2016. (in Russian).

7. **Terekhin A.A., Dadenkov D.A.** Obzor Sposobov Identifikatsii Parametrov Asinkhronnogo Elektropriroda. Vestnik Permskogo Natsional. Issledovatel'skogo Politekh. Un-ta. Seriya «Elektrotehnika, Informatsionnye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya». 2017;2:55—66. (in Russian).

8. **Alekseev A.S., Zamyatin S.V., Sukhodoev M.S., Pushkarev M.V.** Poluchenie Matematicheskogo Opisanija Dinamicheskikh Ob'ektov po Eksperimental'nykh Dannym na Osnove Veshchestvennogo Interpolyatsionnogo Metoda. Nauchnyy Vestnik Novosibirskogo Gos. Tekhn. Un-ta. 2011;2:73—82. (in Russian).

9. **Rudnitskiy V.A., Alekseev A.S., Kurgankin V.V.** Identifikatsiya Ob'ektov Upravleniya v Forme Diskretnykh Peredatochnykh Funktsiy na Osnove Veshchestvennogo Interpolyatsionnogo Metoda. Izvestiya Tomskogo Politekh. Un-ta. 2012;320;5:89—94. (in Russian).

10. **Alekseev A.S., Antropov A.A., Goncharov V.I., Zamyatin S.V., Rudnitskiy V.A.** Veshchestvennyy Interpolyatsionnyy Metod v Zadachakh Avtomaticheskogo Upravleniya. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Un-ta, 2009. (in Russian).

11. **Kurgankin V.V., Zamyatin S.V., Alekseev A.S.** Primenenie Vstraivaemykh Sistem Upravleniya dlya Resheniya Zadachi Identifikatsii. Izvestiya Tomskogo Politekh. Un-ta. 2011;5:39—42. (in Russian).

12. **Terekhov V.M., Osipov O.I.** Sistemy Upravleniya Elektropriwodov. M.: Akademiya, 2005. (in Russian).

13. **Ivankov V.A., Tararykin S.V., Tyutikov V.V., Krasil'nik'yants E.V.** Modal'noe Upravlenie Vzaimosvyazanymi Elektroprivodami s Uprugimi Zven'yami i Zazorami v Kinemacheskikh Peredachakh. Vestnik IGEU. 2006;3:43—48. (in Russian).

14. **Polyushchenkov I.S.** Razrabotka Sistemy Upravleniya Elektropriroda na Osnove Metoda Model'no-orientirovannogo Programirovaniya. Vestnik MEI. 2016;6:87—95. (in Russian).

15. **Полющенко И.С.** Разработка программного обеспечения для управления электроприводом в технологической системе с применением метода модельно-ориентированного программирования // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 83—91.

15. **Polyushchenkov I.S.** Razrabotka Programmno Obespecheniya dlya Upravleniya Elektroprivodom v Tekhnologicheskoy Sisteme s Primeneniem Metoda Model'no-orientirovannogo Programmirovaniya. Vestnik MEI. 2017;4:83—91.

**Сведения об авторе:**

**Полющенко Игорь Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханических систем Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: polyushenkov.igor@yandex.ru

**Information about author:**

**Polyushchenkov Igor S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: polyushenkov.igor@yandex.ru

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the author declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 27.11.2017

**The article received to the editor:** 27.11.2017