

УДК 681.587.73

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ ТЕЛЕСКОПА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.Г. Ильина

Рассмотрена процедура параметрической идентификации безредукторного высокомоментного прецизионного электропривода опорно-поворотного устройства телескопа траекторных измерений, проводимая в целях синтеза параметров регуляторов его подчиненной САР. В результате проведенной идентификации вычислены параметры теоретической модели электропривода, позволившие в достаточной для решаемой задачи степени приблизить свойства математической модели к свойствам объекта управления.

**Ключевые слова:** прецизионный электропривод, параметрическая идентификация.

### Введение

Синтез прецизионной системы управления телескопом траекторных измерений (ТТИ) невозможен без адекватной объекту математической модели моментного электропривода опорно-поворотного устройства (ОПУ). Развитие машинно-ориентированных методов проектирования систем автоматического регулирования (САР) позволяет использовать для получения таких моделей методы параметрической и непараметрической идентификаций.

Основными особенностями моментных электроприводов ОПУ ТТИ являются [1, 2]: широкий диапазон скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок наведения, инфранизкие скорости движения оптической оси ТТИ (единицы угловых секунд за секунду), использование уникальных прецизионных датчиков координат, жесткость конструкции осей ОПУ ТТИ и, как следствие, возникновение механического резонанса на частотах от единиц Гц. Поэтому в качестве электромеханических преобразователей в исполнительных осях ОПУ рассматриваемых ТТИ (рис. 1, а) с целью максимального упрощения кинематических передач выбираются встраиваемые в ОПУ высокомоментные синхронные машины с постоянными магнитами на роторе, используемые в режиме вентильного двигателя (ВД) [3, 4]. Эти машины отличаются малым энергопотреблением на инфранизких скоростях и большим отношением вращающего момента к моменту инерции ротора, определяющим предельное быстродействие машины. Термин «моментный» означает, что двигатели спроектированы специально для режима вращения с малой скоростью (строго говоря, для пускового режима), когда можно не учитывать все потери, связанные с быстрым вращением ротора.

В настоящей статье ставится задача получения адекватной математической модели моментного электропривода азимутальной оси совместно с его нагрузкой – ОПУ ТТИ, описывающей этот сложный механический объект управления в виде двух сосредоточенных масс, соединенных жесткой связью, т.е. системы, обладающей одним механическим резонансом.

Решение поставленной задачи обеспечивается посредством определения части коэффициентов уравнений модели с помощью параметрической идентификации. В век повсеместного внедрения информационных технологий сложнейший математический аппарат параметрической и непараметрической идентификации, превращенный Mathworks при сотрудничестве пионера современной идентификации и всемирно известного специалиста в области теории автоматического управления Л. Льюнга в доступный и удобный инструмент, не является более серьезным препятствием к ее практическому применению в задачах синтеза систем управления. Однако успешное применение параметрической идентификации требует задания априорных значений искомых параметров, для чего, учитывая сложность конструкции рассматриваемого объекта управления, целесообразно подвергнуть анализу 3-d модель конструкции (рис. 1, б) для нахождения значений параметров неэлектрической природы. 3-d модель может быть реализована в любой из множества сред разработки, таких как SolidWorks или AutoCAD, а анализ конструкции на частотные и другие свойства легко реализуется в пакетах типа ANSYS.

В статье представлена последовательность операций, проводимая с применением упомянутых пакетов и сред и позволяющая получить адекватную ОПУ ТТИ двухмассовую математическую модель.

Рассмотрим математическую модель вентильного двигателя (ВД), работающего на двухмассовую нагрузку с жесткой связью. Известно, что математическая модель ВД может быть без существенной потери информативности упрощена и представлена моделью двигателя постоянного тока (ДПТ) [1, 3]. Тогда система уравнений электропривода, работающего на нагрузку с жестким валом, будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = -\frac{i}{\beta} - c_e \Omega_1 + u; \\ J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = c_m i - M_{c1} - M_{12} - M_{\text{каб.пер.}}; M_{\text{каб.пер.}} = K \cdot \alpha_1; \\ \frac{d\alpha_1}{dt} = \Omega_1; \\ \frac{db}{dt} = c_{12} (\Omega_1 - \Omega_2); M_{12} = b + m(\Omega_1 - \Omega_2); \\ J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2}; \\ \frac{d\alpha_2}{dt} = \Omega_2, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $L, R$  – индуктивность и сопротивление фазы ВД,  $i, u$  – ток в фазе ВД и напряжение, приложенное к фазе ВД,  $c_e$  – конструктивная постоянная по ЭДС,  $c_m$  – постоянная по моменту,  $\Omega_1, \Omega_2$  – скорости вращения первой и второй массы,  $M, M_{c1}, M_{c2}, M_{12}$  – электромагнитный момент двигателя, моменты сопротивления вращению первой и второй масс и момент, создаваемый нежесткой связью,  $M_{\text{каб.пер.}}$  – момент возмущения, создаваемый кабельным переходом, связанный с углом поворота первой массы коэффициентом жесткости  $K$ ,  $c_{12}$  – коэффициент жесткости упругой связи,  $m$  – коэффициент демпфирования,  $J_1, J_2$  – приведенные к оси вращения моменты инерции первой и второй масс,  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы поворота первой и второй масс,  $z_p$  – число пар полюсов двигателя,  $\beta = \frac{\cos(\arctg(z_p \Omega_1 T_f))}{\sqrt{R^2 + (z_p \Omega_1 R T_f)^2}} \leq \frac{1}{R}$  – коэффициент приведения

ВД к ДПТ (для моментных двигателей, работающих на инфранизких скоростях  $\beta \approx \frac{1}{R}$ ) [3]. Параметры, требующие определения для приведения математической модели (1) к реальному объекту –  $J_1, J_2, c_e, c_{12}, c_m, m$ , тогда как известными можно считать подлежащие измерению  $R$  и  $T_f$ .

При проведении параметрической идентификации требуется определить примерные (так называемые начальные или априорные) значения искомым параметров, так как при большом количестве неизвестных возможно множество решений поставленной задачи, и полученная таким образом модель может оказаться недостоверной. Априорные значения параметров  $J_1, J_2$  и  $c_{12}$  могут быть получены по 3-d модели (рис. 1, б, в) ОПУ ТТИ и его реальной частотной характеристике (рис. 2).

На рис. 1 представлены фотография опытного образца ОПУ ТТИ (а) и его 3-d модель (б–г), реализованная в SolidWorks.

САПР Solid Works позволяет провести расчет приведенных к азимутальной оси моментов инерции «сборок» (рис. 1, в, и 1, г) и, таким образом, установить приближенные значения моментов инерции  $J_1$  и  $J_2$  обеих сосредоточенных масс. Из выражения, определяющего резонансную частоту двухмассового механизма,  $\omega_{0p} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} / \sqrt[4]{((J_1 + J_2) / J_1)^3}$  [6], и значения нижней частоты резонанса на экспериментальной АЧХ опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 2) находим значение жесткости упругой связи  $c_{12}$ . Априорные значения  $c_e$  и  $c_m$ , связанные соотношением  $c_m = 1,5c_e$  [3], можно грубо оценить как отношение выходного и входного сигналов ОПУ ТТИ в установившемся режиме работы, так как при жесткой связи ( $c_{12} \rightarrow \infty$ ) обеих масс передаточная функция вентильного электропривода без учета влияния момента сопротивления кабельного перехода примет вид

$$W(p) = \frac{\Omega(p)}{u(p)} = \frac{1/c_e}{\frac{T_f J_s R}{c_e c_m} p^2 + \frac{J_s R}{c_e c_m} p + 1},$$

где  $J_s = J_1 + J_2$  – суммарный момент инерции.

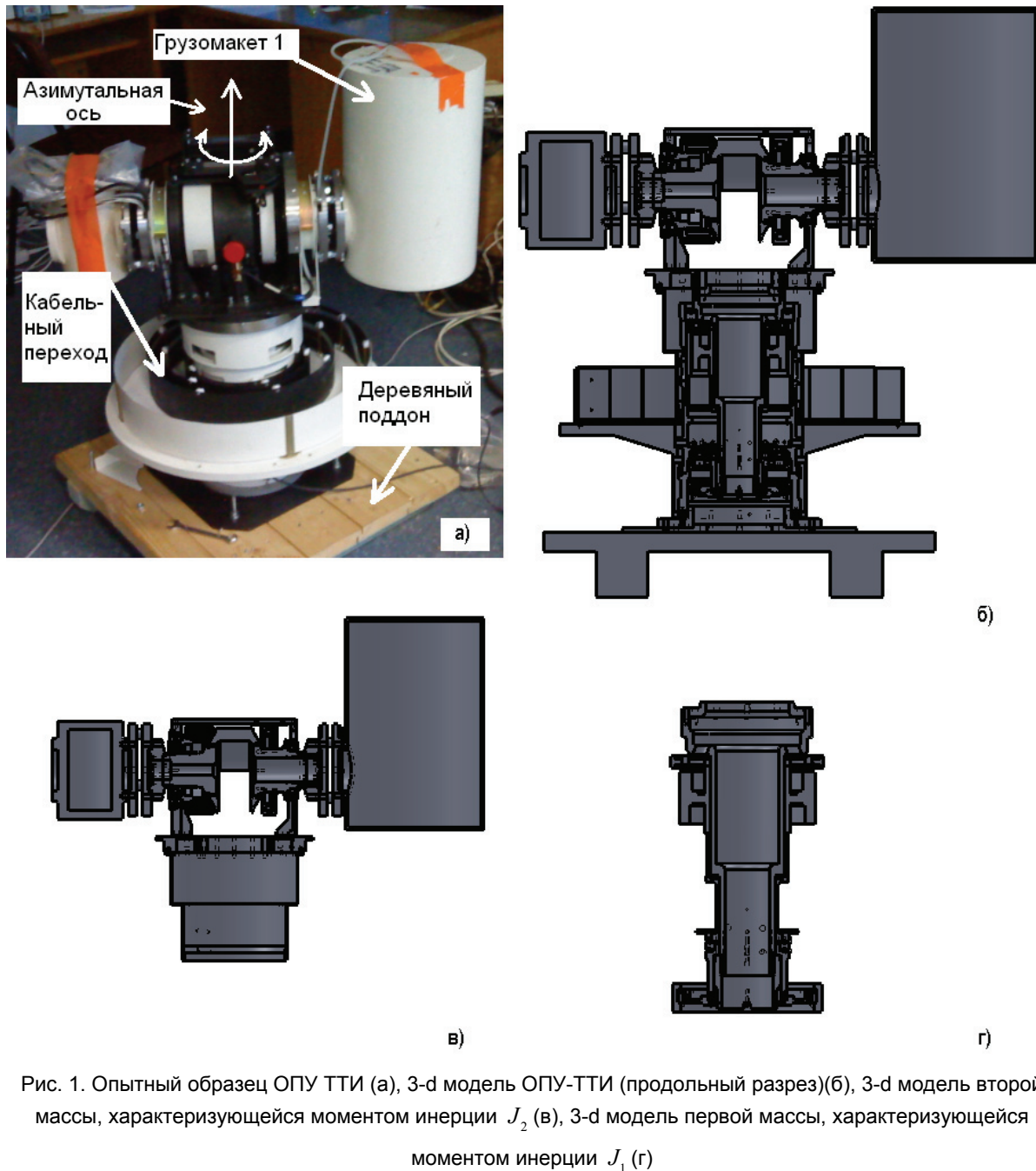


Рис. 1. Опытный образец ОПУ ТТИ (а), 3-d модель ОПУ-ТТИ (продольный разрез)(б), 3-d модель второй массы, характеризующейся моментом инерции  $J_2$  (в), 3-d модель первой массы, характеризующейся моментом инерции  $J_1$  (г)

Параметрическая идентификация ОПУ ТТИ проводится методом Estimating ODE parameters [5]. Этот метод может применяться для проведения параметрической идентификации в нашем случае, так как система дифференциальных уравнений, описывающих объект, известна. В качестве входного сигнала из ряда стандартных тестовых сигналов для решения поставленной задачи выбран меандр напряжения. При других стандартных тестовых сигналах (импульсная характеристика или белый шум в объекте) могут возникнуть колебания во всем частотном спектре, что, учитывая наше представление объекта двух-массовой моделью с одним резонансом, является некорректным. При использовании линейно нарастающего входного задания частотная характеристика будет искажена демпфирующим воздействием кабельного перехода.

Рассмотрим процесс идентификаций методом Estimating ODE parameters. Для проведения идентификации модель (1) следует представить в матричной записи (здесь  $e(t)$  – белый шум):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t), \\ x(0) &= x_0. \end{aligned} \tag{2}$$

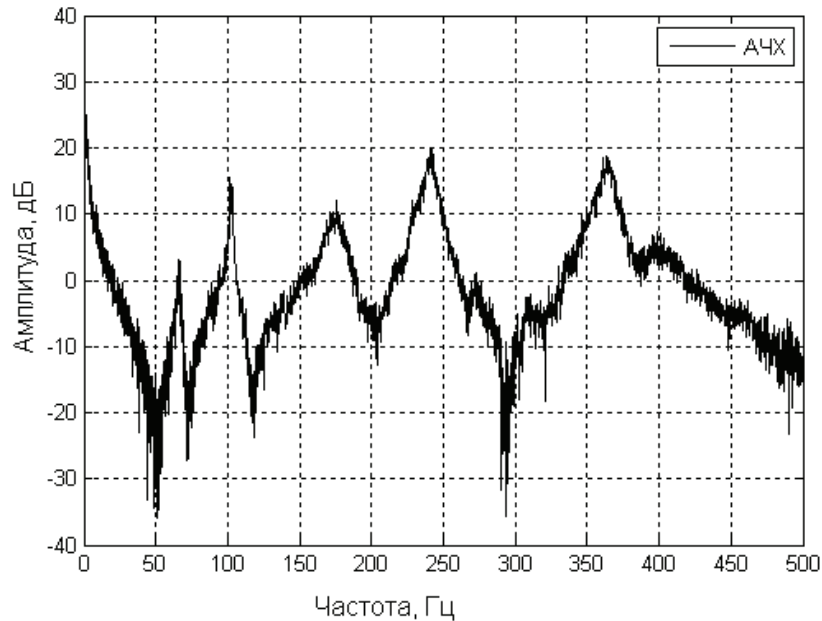


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 1, а)

Так как на рис. 3 наблюдается низкая зашумленность сигнала скорости, то влиянием шума измерений и шума объекта можно пренебречь. Матрицы исследуемой системы имеют следующий вид:

$$y = [i \quad \Omega_1 \quad \alpha_1 \quad \Omega_2 \quad \alpha_2]^T; \quad u = [U \quad b \quad \alpha_{1\_отн} \quad b];$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_f & -ce/L & 0 & 0 & 0 \\ cm/J_1 & -m/J_1 & -c12/J1 & m/J_1 & c12/J1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m/J_2 & c12/J2 & -m/J_2 & -c12/J2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Mc1/J_1 & -K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Mc2/J_1 \end{bmatrix};$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad K = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad D = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0];$$

$$x(0) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

Для вычисления значений параметров записанной в матричном виде системы уравнений в рабочей области Matlab задаются следующие команды:

$$\text{model} = \text{idgrey}('OPU', \text{parameter}, 'c', 0.001, 0); \text{model} = \text{pem}(\text{dannie}, \text{model}); \quad (3)$$

где "OPU" представляет собой функцию, задающую структуру модели:

```
function [A,B,C,D,K,x0] = OPU(par,T,CDmfile,aux)
A=[(-1/Tf), -par(1)/L, 0, 0, 0; 1.5*par(1)/par(2), -par(3)/par(2), -par(4)/par(2), par(3)/par(2), par(4)/par(2); 0, 1, 0, 0, 0; 0, par(3)/par(5), par(4)/par(5), -par(3)/par(5), -par(4)/par(5); 0, 0, 0, 1, 0];
B=[1/L 0 0 0; -par(6)/J1 -par(7) 0; 0 0 0 0; 0 0 0 -par(8)/J2; 0 0 0 0];
C=[0, 1, 0, 0, 0];
D=[0 0 0 0];
K=zeros(5,1);
x0=[0; 0; 0; 0; 0];
```

"parameter" – файл, содержащий априорные значения искомым параметров; dannie=iddata(s,u,Td) – входные данные идентификации, сформированные из сигналов: s – массив данных скорости объекта, u – массив данных управляющего напряжения, Td – шаг измерений в секундах.

В результате выполнения команд (3) с учетом принятых допущений и при условии, что искомое решение существует, формируется модель заданной структуры с параметрами, близкими по значениям к указанным в файле `parameter.m`, и обладающая динамическими свойствами, сходными с реальным объектом. На рис. 3 представлены графики изменения угловой скорости при подаче входного меандра напряжения, полученные на опытном образце ОПУ ТТИ и при моделировании системы уравнений (1) где в качестве значений параметров используются полученные параметрической идентификацией методом `Estimating ODE parameters`.

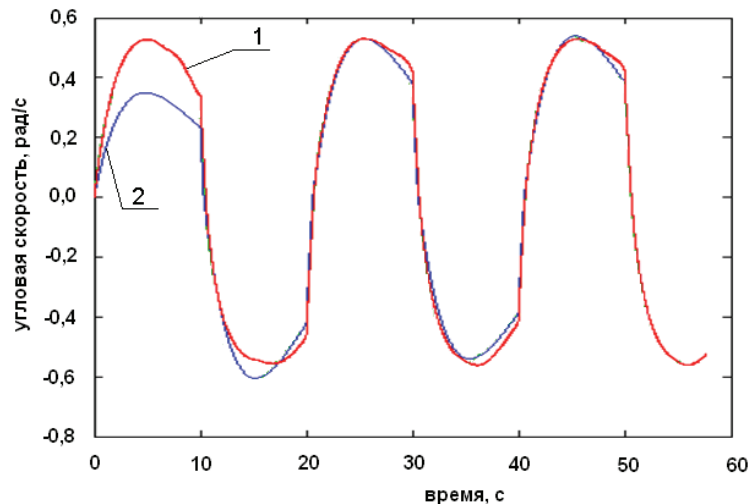


Рис. 3. Сигналы изменения скорости разомкнутого вентильного электропривода при реакции на входной сигнал управления типа меандр: 1 – опытный образец ОПУ ТТИ (рис. 1, а), 2 – найденная математическая модель

Как уже отмечалось, конечной целью получения адекватной математической модели объекта является синтез его системы управления. Продемонстрируем работу замкнутого контура скорости опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 1, а), настроенного на технический оптимум (ТО), причем параметры ПИ регулятора контура рассчитаны на основании динамических свойств найденной с помощью идентификации модели. На рис. 4 представлены графики эталонной кривой отработки настроенной на ТО САР скорости входного ступенчатого воздействия и угловая скорость в САР скорости вращения оптической оси ОПУ ТТИ при реакции на тот же сигнал.

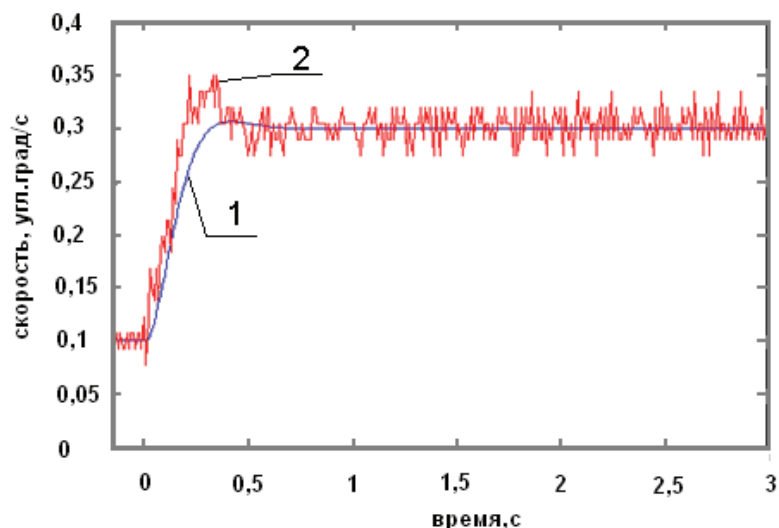


Рис. 4. Эталонная кривая (кривая 1) переходного процесса в замкнутом контуре скорости математической модели (1), настроенном на технический оптимум при отработке входного ступенчатого задающего сигнала, и аналогичный процесс в контуре скорости опытного образца ОПУ ТТИ (кривая 2)

### **Выводы**

Проведена параметрическая идентификация, в результате которой получена математическая модель, удовлетворительно описывающая поведение реального объекта – опытного образца ОПУ ТТИ.

Применение разработанной модели при синтезе САР опытного образца ОПУ ТТИ приводит к гарантированному обеспечению желаемых качественных показателей проектируемой системы, а также значительно сокращает время на ее настройку.

### **Литература**

1. Кротенко В.В., Толмачев В.А., Томасов В.С., Сеницын В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 23–30.
2. Гурьянов А.В., Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровых систем управления с широтно-импульсными преобразователями и эталонными моделями // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 3. – С. 17–24.
3. Микеров А.Г. Управляемые вентильные двигатели малой мощности: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во ГЭТУ, 1997. – 64 с.
4. Takeshita T., Matsui N. Sensorless Brushless DC Motor Drive with EMF Constant Identifier // IECON-94. –1994. – V.1. – P. 8–13.
5. Ljung L. System Identification Toolbox 7 User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/ident/ident.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/ident/ident.pdf), своб.
6. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.

*Ильина Азгля Геннадьевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, [dvanoska@mail.ru](mailto:dvanoska@mail.ru)