

# Математическая модель объекта регулирования на базе моментного электропривода

**Сергей Капралов, Владимир Матвеев, Виктор Майоров, Денис Павлов, Максим Таранец (г. Великий Новгород)**

Предложен вариант макромоделли объекта регулирования и математическое описание её структуры. Апробация модели в первом приближении показала удовлетворительные результаты, однако для получения более качественных оценок требуется её детализация, а также разработка и практическая реализация методик измерения характеристик и идентификации параметров объекта регулирования.

## ВВЕДЕНИЕ

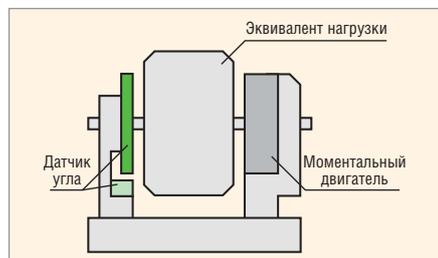
Появление новых электронных компонентов с уникальными характеристиками принципиально изменило подход к построению радиоэлектронной аппаратуры. При этом удаётся повысить качество преобразования электрической энергии, уменьшить внутренние потери и весогабаритные показатели. Построенные на новых компонентах модули и узлы требуют проведения тщательного компьютерного анализа всех режимов работы, чтобы обеспечить надёжность – главный критерий работы изделия.

Как показывает практика, экспериментальный подбор большинства параметров и отладка алгоритмов является весьма сложным и трудоёмким процессом. Математические модели отдельных звеньев позволяют значительно упростить задачу разработки и

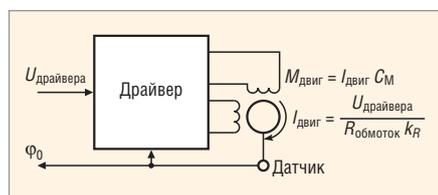
настройки конечного изделия. В свою очередь, точность компьютерного моделирования определяется качеством математических моделей компонентов, входящих в состав системы.

Требования высокой точности накладывают существенные ограничения на использование универсальных моделей. Современные пакеты математического моделирования и автоматизированного проектирования включают в себя библиотеки моделей компонентов электронной техники, однако в них использованы усреднённые параметры приборов и, как правило, не указан допустимый разброс, что снижает эффективность моделирования.

В связи с этим возникает необходимость создания адекватной модели объекта регулирования на базе моментного электропривода, обеспечивающей возможность корректировки максимального количества параметров, что позволит разработчику ускорить экспериментальную «подгонку» системы, сосредоточив усилия на повышении качества её работы. Кроме того, практически важным является проведение работ по моделированию технических решений и установлению областей их практического применения, а также разработка инженерных методик расчёта устройств и систем на базе моментного электродвигателя.



**Рис. 1. Объект регулирования на базе моментного электродвигателя**



**Рис. 2. Драйвер моментного электродвигателя**

- разработка модели объекта регулирования на базе моментного электропривода;
- построение блока формирования управляющих сигналов в виде системы автоматического регулирования устройства.

Ввиду особенности конструкции объекта регулирования на базе моментного электропривода, последний удобнее представить в виде макромоделли, содержащей набор характеристических компонентов. В этом случае наиболее эффективным является подход к определению с помощью многооткликовых регрессионных моделей параметров эквивалентной схемы объекта как многополюсника.

Таким образом, на основании анализа существующих моделей строится наиболее эффективная структура с точки зрения функциональности, достаточности набора параметров и вычислительных затрат.

## ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В данном случае объект регулирования (см. рис. 1) представляет собой бесконтактный моментный электродвигатель, сопряжённый с датчиком углового положения и эквивалентом нагрузки. Конструкция не содержит редуктора и, соответственно, связанных с ним люфтов, зазоров и моментов трения.

Кроме того, в состав объекта регулирования входит драйвер (см. рис. 2), обеспечивающий формирование синусоидального управляющего воздействия с периодом, укладывающимся между двумя соседними полюсами постоянных магнитов ротора.

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для обеспечения оптимального и качественного управления подвижным объектом необходимо построить многоконтурную систему автоматическо-

## Постановка задачи

Учитывая актуальность данного направления, а также требования к качеству модели, авторами работы поставлены следующие задачи:

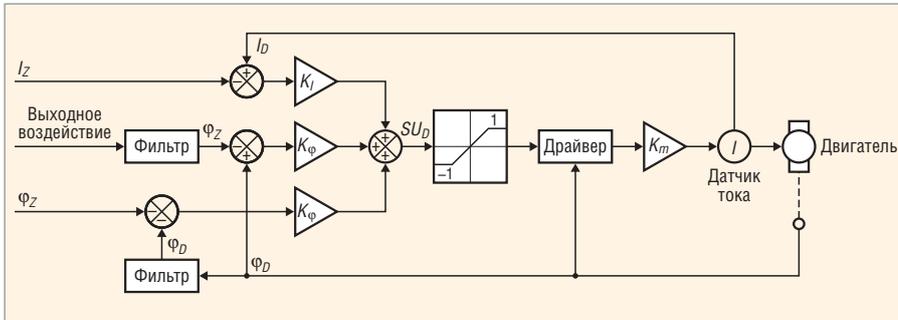


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования

го регулирования, имеющую на выходе устойчивый сигнал, т.е. составить описание процессов в пространствах состояний.

Концепция построения системы управления электроприводом включает в себя следующие положения:

- электропривод должен иметь малую колебательность, т.е. быть замкнут по положению и скорости с помощью регулятора состояния;
- для достижения высокой точности позиционирования и стабилизации скорости необходима быстрая реакция двигателя на управляющие и регулирующие воздействия. Это можно обеспечить работой двигателя в вентильном режиме реверсированием фаз тока, являющегося функцией положения подвижной части;
- использование обратной связи обеспечивает хорошее подавление возмущений. Однако реакция системы на изменение управляющего воздействия при этом не оптимальна. Использование принципа комбинированного управления с программным корректором управления, учитывающим динамику замкнутого электропривода, обеспечивает значительное уменьшение ошибок состояния при изменении задания в канале управления;
- в обратной связи по положению необходимо использовать датчик положения требуемой точности. Обратная связь на выходе регулятора не должна иметь помех и шума квантования, вызывающих значительные пульсации скорости и акустический шум.

Проблема достижения требуемой точности заключается в выборе средств, повышающих точность системы (усилительных и изодромных блоков), т.е. фактически вида регулирования.

Обеспечение приемлемого характера переходных процессов (демпфирования) заключается в выборе оптималь-

ных корректирующих средств. Проблема коррекции состоит в повышении динамической точности системы автоматического регулирования в переходных режимах. Стремление снизить ошибки регулирования в типовых режимах приводит к необходимости использования таких значений общего коэффициента усиления, при которых без принятия специальных мер (введения пассивных звеньев) система оказывается неустойчивой.

Для хорошо демпфированных систем скорость спада логарифмической АЧХ составляет 6...20 дБ на декаду увеличения частоты. Введение корректирующих звеньев должно так изменить вид ЛАЧХ, чтобы она в том же диапазоне частот пересекала ось частот с наклоном не более 20 дБ/дек.

Метод повышения запаса устойчивости в виде демпфирования с подавлением средних частот применяется наиболее часто, поскольку позволяет сохранить точность САР и полосу пропускания (быстродействие). Демпфирование осуществляется с помощью пассивного интегро-дифференцирующего звена и позволяет корректировать ЛАЧХ с наклоном 40 дБ/дек. Однако корректирующее звено вносит дополнительные фазовые сдвиги в низкочастотной области.

### Блок формирования управляющих сигналов

Для моментного электропривода характерна идеология построения системы управления в пространстве переменных состояний, т.е. управляющее устройство по текущему углу поворота и частоте вращения вырабатывает требуемое значение электромагнитного момента, которое реализуется с помощью схемы питания, формирующей соответствующие значения токов управления.

Структурная схема контура управления вместе с объектом регулирования представлена на рисунке 3. Данная система обладает устойчи-

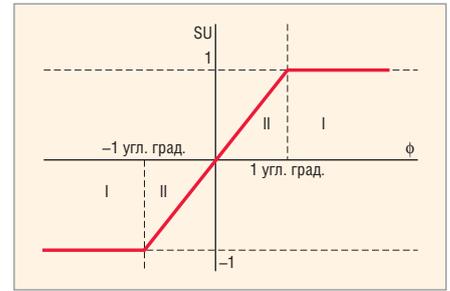


Рис. 4. Дискриминационная характеристика контура

востью при конкретных значениях коэффициентов усиления регулятора, определение которых также является задачей настоящей работы.

Сигнал управления, подаваемый на вход драйвера моментных электродвигателей, формируется в соответствии с выражением:

$$SU_{D(i)} = K_{\phi}(\phi_Z(i) - \phi_D(i)) + K_I(I_Z(i) - I_D(i)), \quad (1)$$

где:  $K_{\phi}$  – коэффициент усиления по положению (вольт на обмотке двигателя/радиан поворота датчика);  $\phi_Z(i)$  – задание по углу ( $i$ -е значение);  $\phi_D(i)$  – показания датчика углового положения ( $i$ -е значение);  $K_I$  – коэффициент усиления по скорости (вольт на обмотке двигателя/радиан поворота датчика за секунду);  $\phi_Z(i)$  – задание по скорости ( $i$ -е значение);  $\phi_D(i)$  – расчётное значение скорости по датчику угла ( $i$ -е значение);  $K_I$  – коэффициент усиления по току (вольт на обмотке двигателя/ампер датчика тока);  $I_Z(i)$  – задание по току ( $i$ -е значение);  $I_D(i)$  – измеренное значение по датчику тока ( $i$ -е значение).

На рисунке 4 показана дискриминационная характеристика контура. Сигнал управления определяется условиями:

в зоне I:

$$SU_I = 1, \text{ если } SU_I > 1; \\ SU_I = -1, \text{ если } SU_I < -1;$$

в зоне II:

$$SU_{II} = (\phi_Z - \phi_D)k.$$

В данном случае мы имеем дело с цифровой системой, построенной на базе средств вычислительной техники. Использование элементов с дискретной природой (ЦВМ, устройств ввода/вывода) определяет наличие двух процессов в системах цифрового управления: дискретизацию сигналов по времени и квантование сигналов по уровню. Первый процесс делает систе-

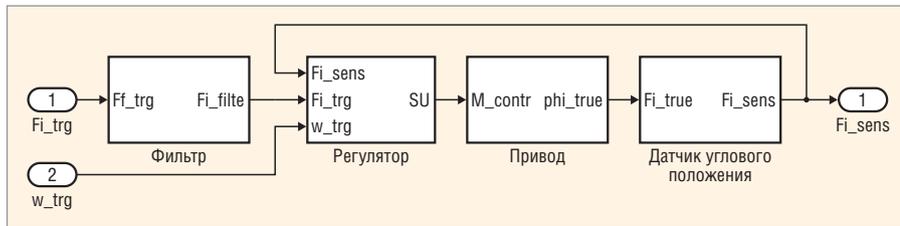


Рис. 5. Структура модели моментного электропривода

му дискретной, а квантование по уровню – нелинейной. Оба процесса сопровождаются возникновением методических погрешностей.

Выбор частоты дискретизации производится, исходя из ширины полосы пропускания или времени регулирования замкнутой системы. Разумные значения частоты дискретизации в 6–10 раз превышают верхнюю границу полосы пропускания или составляют 2–4 отсчёта за время нарастания, в противном случае качество регулирования системы резко ухудшается. Кроме того, возможны ситуации, когда выполняемые ЦВМ задачи (опрос датчиков, вычисления, формирование информационных потоков, запись в порты вывода) могут быть выполнены только при систематической задержке синтезируемого воздействия на один такт дискретизации. В таком случае в системе регулирования с ЦВМ появится запаздывание, которое должно быть учтено оператором запаздывания и, возможно, смещённой передаточной функции.

**Модель объекта регулирования**

Структурная схема модели объекта регулирования на базе бесконтактного моментного электропривода приведена на рисунке 5. В ней можно выделить следующие функциональные узлы:

- фильтр входного воздействия;
- Fi\_trg – задание по углу (угл. град) или траектория движения;

- w\_trg – задание скорости движения (угл. град/с);
- регулятор – система регулирования;
- привод – моментный электродвигатель;
- датчик углового положения.

Выходным параметром САР является воздействие в виде напряжения, прикладываемого к обмоткам бесконтактного моментного электродвигателя с постоянными магнитами, в результате чего на выходе модели двигателя появляется значение угла поворота ротора (phi\_true). В системе имеется цифровой датчик углового положения, с выхода которого сигнал обратной связи подаётся на систему регулирования.

Фильтрация входного воздействия осуществляется по закону, представленному на рисунке 6, с целью удержания сигнала управления в зоне регулирования  $\pm 1^\circ$ .

Блок-схема модели регулятора представлена на рисунке 7. Рассмотрим подробнее функциональные модули.

Данная система выполнена в виде пропорционально-дифференциального звена в соответствии с выражением (1). Значения пропорционального (K1) и дифференциального (K2) коэффициентов усиления в реальном изделии определены экспериментально, исходя из условия устойчивости системы.

Для определения угловой скорости движения объекта регулирования, исходя из показаний датчика углового положения, используется дифференцирующее звено. Дискриминатор ско-



Рис. 6. Форма изменения входного воздействия на выходе фильтра

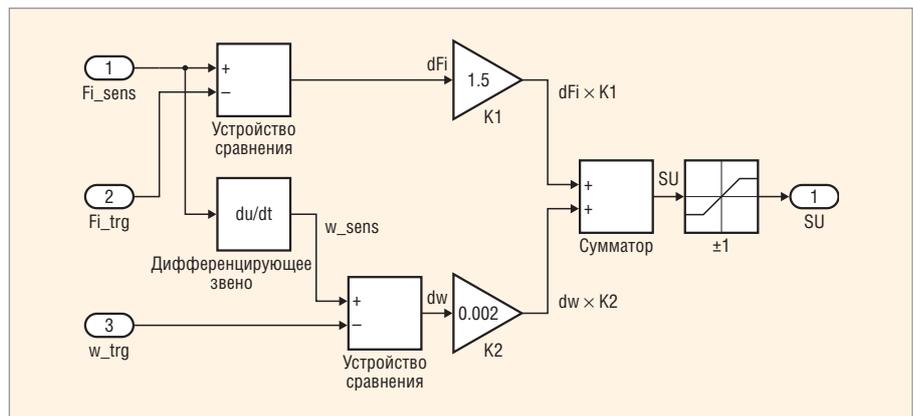


Рис. 7. Структурная схема модели системы регулирования

рости реализован в соответствии с алгоритмом, приведённым на рисунке 8. Структурная схема модели бесконтактного моментного электродвигателя с постоянными магнитами показана на рисунке 9.

В данной модели учтены следующие виды трения:

- сухое трение (трение скольжения), возникающее в подшипниках конструкции;
  - вязкое трение, связанное с возникновением противоЭДС при вращении ротора с постоянными магнитами относительно статора с управляющими обмотками;
  - трение покоя, определяемое параметрами самого электродвигателя.
- Величины всех коэффициентов трения на данном этапе приблизительно определены экспериментальным путём. Точный расчёт этих значений является самостоятельной задачей, требующей большого количества экспериментальных данных и применения громоздкого математического аппарата.

Структурная схема модели датчика угла представлена на рисунке 10. Модель содержит два субмодуля:

- дискретизатор, поскольку физически датчик углового положения представляет собой оптоэлектронное устройство и сигнал на его выходе является дискретной величиной (см. рис. 11);
- устройство, выполняющее предварительную обработку данных в соответствии с принципом функционирования реального устройства (см. рис. 12).

В таблице приведён перечень основных параметров, используемых в модели моментного электропривода. Момент инерции привода определён для реального устройства (см. рис. 1) на основе его АЧХ. Информация с датчика углового положения поступает на вход

системы регулирования с периодом  $T_{sample\_ang}$ . Изменение сигнала управления электродвигателем происходит после окончания цикла расчёта в модуле формирования управляющих сигналов с периодом  $T_{sample\_ext}$ .

Апробация модели на данном этапе производилась путём сравнения реакции моментного привода (см. рисунок 13а) и его модели (рисунок 13б) на единичное ступенчатое воздействие, а также оценки статической ошибки. Входной сигнал подавался на вход системы регулирования без входного фильтра. Модель показала удовлетворительные результаты. Величина статической ошибки стэнда моментного привода составила 0,02 угл. град, а его модели 0,016 угл. град.

**ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Описание физического принципа функционирования моментного электропривода с использованием математического аппарата выглядит следующим образом:

- 1) управляющий сигнал на привод CQ может быть пересчитан в величину механического момента двигателя  $M$

$\Delta\tau$	$< 0,0001$
$\Delta t$	$\Delta t / \Delta\tau = \text{ЦЕЛОЕ}$
$\Delta\varphi$	$10^\circ$
$\varphi_D$	$0,0001$
$B$	$1 \dots 10$
$\Delta t_K$	$0,002$

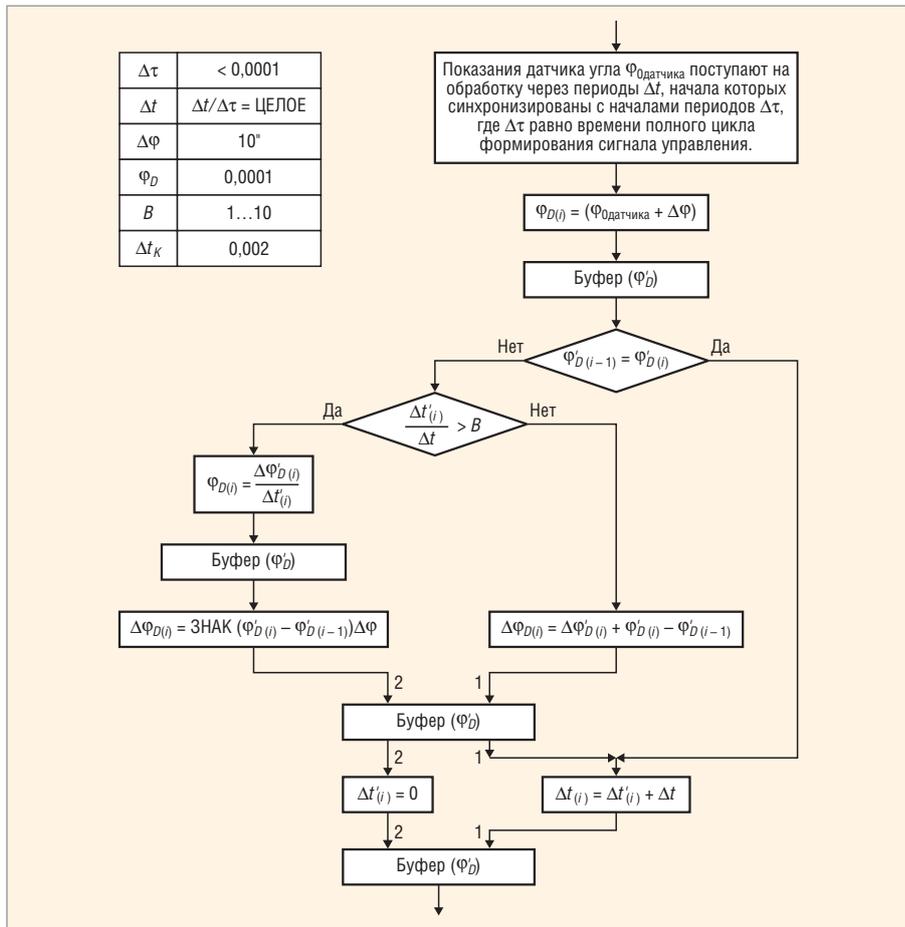


Рис. 8. Алгоритм расчёта угловой скорости двигателя по показаниям датчика

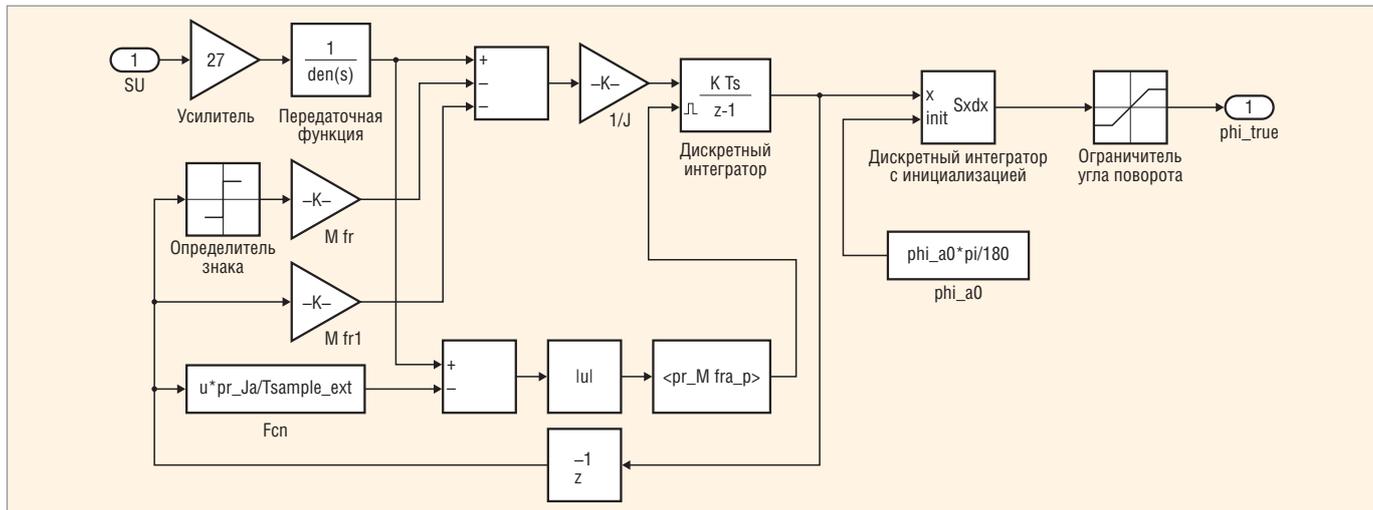


Рис. 9. Модель бесконтактного моментного электродвигателя

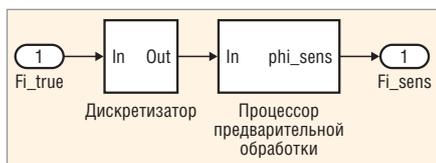


Рис. 10. Структура модели датчика углового положения

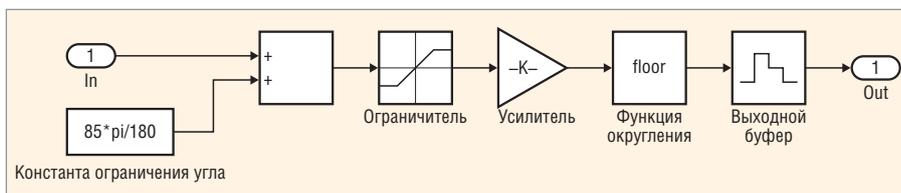


Рис. 11. Структура дискретизатора

с использованием данных о величине угла поворота  $\varphi$ :

$$C^Q(\varphi) \rightarrow: \\ M = \left[ C^Q Quant(\Delta) c_M k_E k_P \frac{1}{\tau s + 1} + M_{fr} \right] Sat(-M_{max} \dots M_{max}) + M_A,$$

где  $M$  – механический момент;  $\varphi$  – угол поворота вала двигателя;  $s = \varphi \omega$  –

оператор дифференцирования;  $c_M$  – коэффициент момента двигателя;  $\tau$  – электромагнитная постоянная времени двигателя;  $k_E(\varphi) = 1 - \frac{|\varphi| c_E}{U}$  – коэффициент, учитывающий влияние противоЭДС ( $c_E$  – коэффициент противоЭДС;  $U$  – напряжение питания двигателя;  $k_P(\varphi) = 1 + c_P \sin(\varphi N + \varphi_0)$  – коэффициент, учитывающий влияние неравномерности момента за оборот ( $c_P$  определяет амплитуду пульсаций момента);  $N$  – число пар

полюсов двигателя;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $Quant(\Delta)$  – оператор, учитывающий разрядность ШИМ;  $M_{fr} = M_{frCoulomb} + M_{frviscous}$  – момент трения ( $M_{frCoulomb}(\varphi) = -M_{ofrC} \sin(\varphi)$  – момент кулоновского трения,  $M_{ofrC}$  – постоянная кулоновского трения;  $M_{frviscous}(\varphi) = -k_{frV} \dot{\varphi}$  – момент вязкого трения ( $k_{frV}$  – коэффициент вязкого трения).

2) угловая скорость  $\dot{\varphi}$  определяется, исходя из значения механического момента  $M$ :

3)  $M \rightarrow \dot{\varphi}$ :

$$\dot{\varphi} = \left[ k_{frS1} k_{frS2} \frac{1}{J s} M \right] Sat(-\omega_{max} \dots \omega_{max})$$

где  $J$  – момент инерции вала двигателя;  $s = j\omega$  – оператор дифференцирования;

$$k_{frS1}(M, \varphi) = \begin{cases} 0, & \dot{\varphi} = 0, |M| < M_{ofrS1} \\ 1, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

учёт трения покоя при старте;  $M_{ofrS1}$  – константа;

$$k_{frS2} \left( \dot{\varphi}, \frac{d|\dot{\varphi}|}{dt} \right) =$$

$$= \begin{cases} 0, & \dot{\varphi} \neq 0, \frac{d|\dot{\varphi}|}{dt} < 0, |\dot{\varphi}| \leq \omega_{ofrS2} \\ 1, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

учёт трения покоя при остановке;  $\omega_{ofrS2}$  – константа.

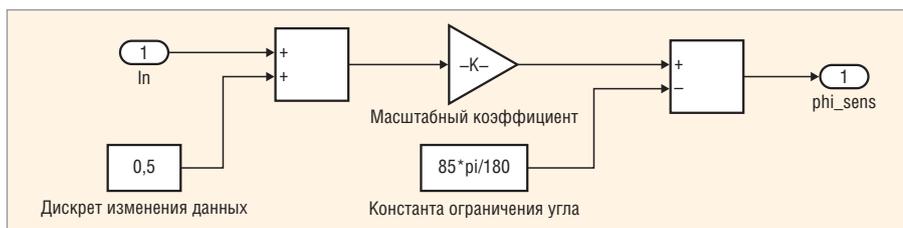


Рис. 12. Структура устройства предварительной обработки

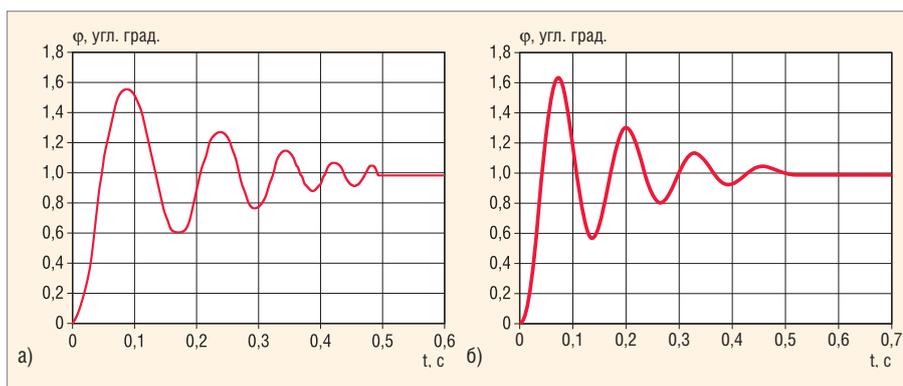


Рис. 13. Переходной процесс при ступенчатом воздействии  
а) Моментный привод, б) модель привода

## Параметры модели

№	Обозначение	Описание	Значение
1	nanp	Разрешение датчика углового положения, бит	18
2	phi_0	Начальный угол привода в момент запуска модели, угл. град	0
3	pr_J	Момент инерции привода, кг м <sup>2</sup>	0,028
4	pr_Mfr_p	Максимальный момент силы трения покоя, Н м	0,02
5	pr_Mfr_s	Момент трения скольжения, Н м	0,01
6	pr_Mfr_v	Коэффициент вязкого трения, Н м с/град	28,64
7	pr_sat	Пусковой момент двигателя, Н м	1,5
8	pr_tau	Постоянная времени двигателя, с	0,080
9	Tsample_ang	Период поступления данных с датчика углового положения, с	0,0001
10	Tsample_ext	Период изменения сигнала воздействия на двигатель (цикл расчёта), с	0,0005
11	K1	Пропорциональный коэффициент усиления	1,5
12	K2	Дифференциальный коэффициент усиления	0,002

4) исходя из величины угловой скорости может быть вычислено истинное значение угла поворота ротора:

$$5) \dot{\varphi} \rightarrow \varphi: \varphi = \frac{1}{s} \dot{\varphi} Sat(\varphi_{\min} \dots \varphi_{\max}),$$

где  $Sat(\varphi_{\min} \dots \varphi_{\max})$  – оператор насыщения (в скобках указан диапазон изменения сигнала).

Данные выражения представляют собой математическую модель моментного электропривода, на базе которой можно осуществить многоот-

кликный регрессионный анализ с целью получения статистических оценок для всего набора параметров.

### Выводы

Использование предложенной модели объекта регулирования позволяет с высокой точностью осуществлять предварительный расчёт режимов работы устройства и качественный анализ системы в целом. На основании результатов моделирования могут

быть внесены поправки в теоретические положения и общую методологию синтеза моментного электропривода.

Для получения адекватных результатов необходимо максимально точно указать в модели все критические параметры. В связи с этим актуальной задачей является разработка и практическая реализация методик измерения характеристик и идентификации параметров объекта регулирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев А.Ю.* Моментный электропривод. Казань, 1997.
2. *Бесконтактные моментные электродвигатели ДБМ: Справочник.* Мосгорпечать, 1992.
3. *Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г.* Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. ЛДНТП, 1987.
4. *Зайцев В.Г.* Теория автоматического управления и регулирования. Высшая школа, 1989.
5. *Справочник по теории систем автоматического управления.* Под ред. *А.А. Красовского.* Наука, 1987.