

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ В MATLAB-SIMULINK

А.В. Бубнов, П.А. Катрич

Омский государственный технический университет
E-mail: info@omgtu.ru

Разработана компьютерная модель и проведено моделирование электропривода с фазовой синхронизацией. Получены временные зависимости и фазовые портреты работы электропривода в переходных режимах работы.

Электроприводы с фазовой синхронизацией, в основе построения которых лежит принцип фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) [1], находят широкое применение при построении обзорно-поисковых и сканирующих систем и устройств, в системах технического зрения современных робототехнических комплексов, установках фототелеграфной и видеозаписывающей аппаратуры, лентопротяжных и регистрирующих устройствах, копировальных установках, многоцветных полиграфических машинах, что обусловлено их высокими точностными показателями в широком диапазоне регулирования угловой скорости.

Электропривод с фазовой синхронизацией является сложной нелинейной системой регулирования, что определяется использованием в контуре ФАПЧВ в качестве сравнивающего элемента логическое устройство сравнения, поэтому при его проектировании требуется тщательный анализ процессов в установившихся и переходных режимах работы. Для решения такой задачи широко используется предварительное моделирование на ПЭВМ с использованием численных методов расчета.

Целью данной статьи является разработка компьютерной модели контура ФАПЧВ и на ее основе моделирование электропривода с фазовой синхронизацией в переходных режимах работы.

Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией представлена на рис. 1, где ЧЗБ – частотно-задающий блок, формирующий импульсы опорной частоты $f_{оп}$; ИЧФД – импульсный частотно-фазовый дискриминатор; Ф – фильтр нижних частот; КУ – корректирующее устройство; БДПТ – бесконтактный двигатель постоянного тока; ИДЧ – импульсный датчик частоты вращения, формирующий z импульсов частоты обратной связи $f_{ос}$ за один оборот вала БДПТ.

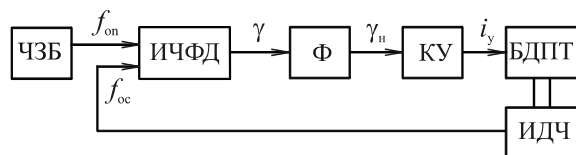


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

Импульсный частотно-фазовый дискриминатор является логическим устройством сравнения частот и фаз импульсных последовательностей $f_{оп}$ и $f_{ос}$. В соответствии с принципом ФАПЧВ алгоритм

функционирования ИЧФД должен обеспечивать три режима работы электропривода: режим разгона с максимальным ускорением (при $f_{оп} > f_{ос}$), пропорциональный (линейный) режим (при $f_{оп} \approx f_{ос}$) и режим торможения с максимальным ускорением (при $f_{оп} < f_{ос}$), что обеспечивается благодаря наличию трех режимов работы ИЧФД: режима насыщения при разгоне ($\gamma = 1/2$), режима фазового сравнения ($\gamma = \Delta\varphi$, где $\Delta\varphi$ – нормированный сигнал фазового рассогласования частот $f_{оп}$ и $f_{ос}$) и режима насыщения при торможении электропривода ($\gamma = -1/2$). Изменение режима работы ИЧФД происходит в момент прихода двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой.

При построении полной модели контура ФАПЧВ [2] целесообразно использовать модель ИЧФД, учитывающую весь комплекс нелинейностей импульсного частотно-фазового дискриминатора (рис. 2) [3]. В этой модели фазовый дискриминатор представлен в виде широтно-импульсного модулятора (ШИМ, выполненного на основе релейного элемента РЭ) сигнала γ' , в режиме фазового сравнения ИЧФД равного $\Delta\varphi$. Модуляция сигнала γ' осуществляется нормированным сигналом фазы $\bar{\varphi}_{оп}$ частоты $f_{оп}$.

Логическая блокировка импульсного частотно-фазового дискриминатора (обусловленная тем, что ИЧФД не может накапливать фазовую ошибку, превышающую угловое расстояние между метками ИДЧ $\varphi_0 = 2\pi/z$) отражена введением на входе фазового дискриминатора многозначного статического нелинейного элемента НЭ, имеющего z линейных участков. В результате синхронизация электропривода возможна при произвольном угловом положении вала, равном $\pm\varphi_0 n$, где n изменяется от 0 до $z-1$. Переход на линейный участок работы осуществляется при изменении знака ошибки по частоте вращения в моменты достижения значений угловой ошибки, равных $\Delta\alpha = -\varphi_0/2 \pm \varphi_0 n$.

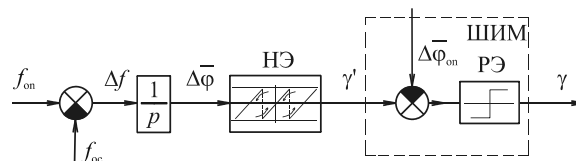


Рис. 2. Полная модель импульсного частотно-фазового дискриминатора

При выполнении условий линеаризации контура ФАПЧВ в пропорциональном режиме работы [2] эк-

вивалентную передаточную функцию широтно-импульсного модулятора и фильтра нижних частот можно принять равной единице. В этом случае, для исследования динамики электропривода с фазовой синхронизацией его структурную схему можно представить в виде системы управления с одним нелинейным элементом НЭ (рис. 3, где $W_k(p)$ – передаточная функция корректирующего устройства, ε_m – максимальное угловое ускорение вала электродвигателя).

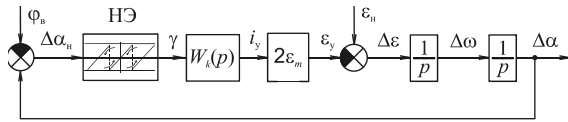


Рис. 3. Структурная схема электропривода, линеаризованного в пропорциональном режиме работы

Возможные траектории движения рабочей точки по характеристике нелинейного элемента представлены на рис. 4. Многозначная статическая нелинейность является довольно специфической, поэтому возникает необходимость ее аналитического описания (для последующего программирования).

Предлагаемая блок-схема работы многозначной нелинейности представлена на рис. 5 [4]. Входная величина x соответствует $\Delta\alpha_n$; выходная величина y соответствует γ ; n – номер участка характеристики НЭ, на котором находится рабочая точка (определяется как округленное значение x/φ_0); R – параметр, определяющий режим работы электропривода в момент запуска программы. Индексы i и $(i-1)$ определяют значение переменной в настоящий момент времени и предыдущее ее значение соответственно.

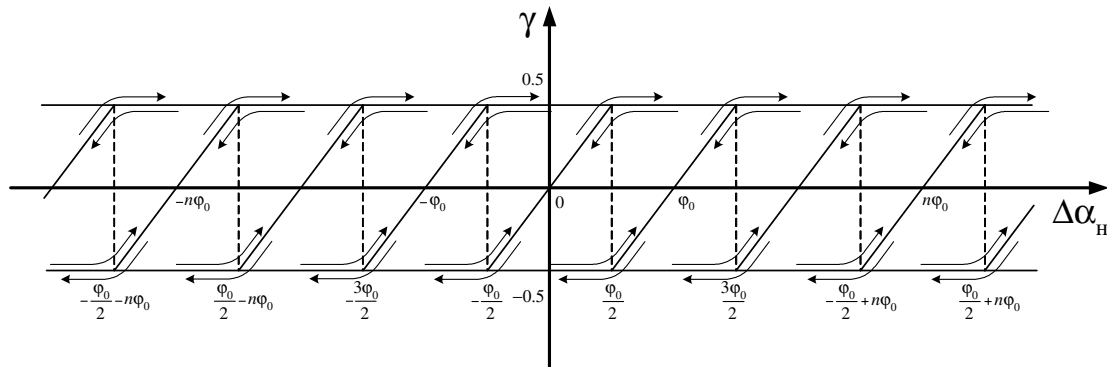


Рис. 4. Траектории движения рабочей точки по характеристике многозначной статической нелинейности

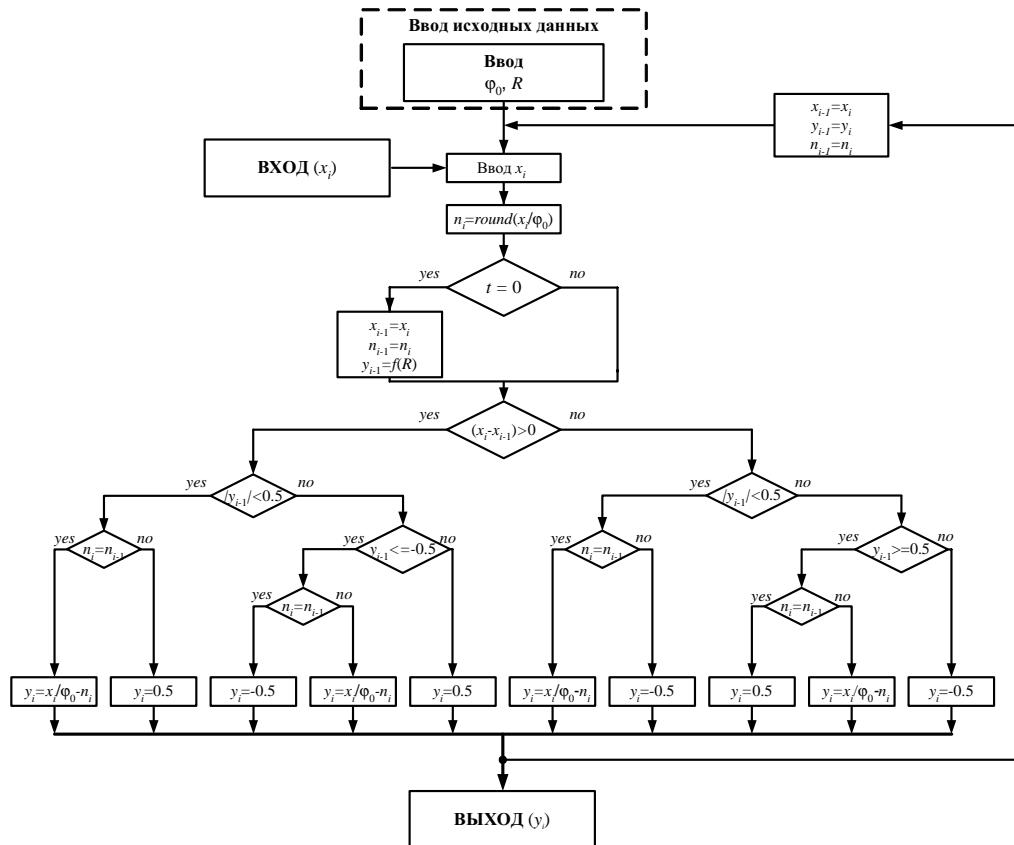


Рис. 5. Блок-схема работы многозначной статической нелинейности

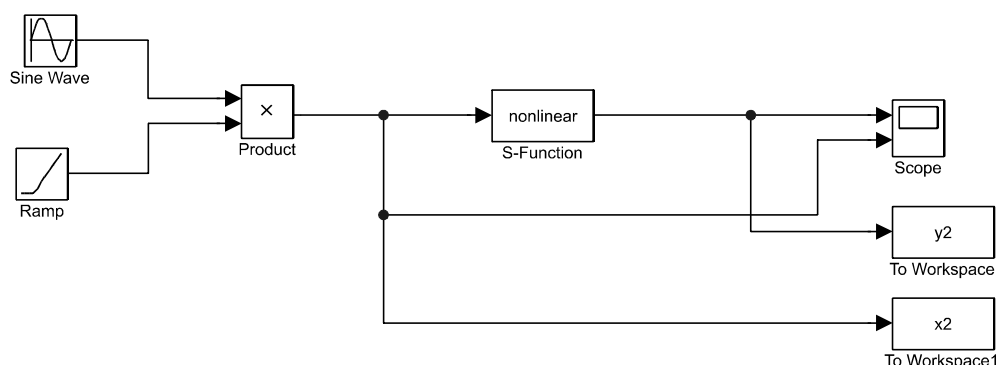


Рис. 6. Схема для моделирования многозначной статической нелинейности

Работа блок-схемы происходит в два этапа. На первом этапе (до запуска программы) задаются два параметра: φ_0 , характеризующий ширину линейного участка характеристики НЭ, и R , характеризующий режим работы ИЧФД в момент запуска программы.

Второй этап начинается непосредственно в момент запуска программы моделирования ($t=0$), когда на вход блока поступает первое значение x_i , соответствующее абсциссе рабочей точки и рассчитывается номер интервала n_i , на котором рабочая точка находится. Величинам x_{i-1} и n_{i-1} присваиваются значения величин x_i и n_i соответственно. Значение y_{i-1} принимается равным 0,5, нулю или минус 0,5 в зависимости от режима работы электропривода R (режим разгона с максимальным ускорением, линейный режим или режим торможения с максимальным ускорением соответственно).

Для получения на выходе блока ординаты рабочей точки y_i в программе выполняются логические и арифметические операции, при этом используются значения x_{i-1} , y_{i-1} , n_{i-1} , соответствующие положению точки в предыдущий момент времени. Сначала проверяется, происходит движение рабочей точки влево ($x_i - x_{i-1} < 0$) или нет (точка неподвижна или движется вправо). Далее проверяется, находилась ли рабочая точка в предыдущий момент времени на линейном участке характеристики ($|y_{i-1}| < 0,5$) или на участке насыщения ($|y_{i-1}| \geq 0,5$). После этого проверяется, перешла ли рабочая точка на соседний интервал нелинейной характеристики. Исходя из всех этих условий, текущее значение y_i соответствует одному из десяти возможных случаев и рассчитывается по одному из трех выражений (рис. 5). Рассчитанное таким образом значение y_i поступает на выход блока. После этого величинам x_{i-1} , y_{i-1} и n_{i-1} присваиваются значения величин x_i , y_i и n_i соответственно, и цикл повторяется.

Проведем моделирование блок-схемы НЭ на ЭВМ в приложении SIMULINK 6.1 программного пакета MATLAB 7. Для расчета переходных процессов воспользуемся методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Поскольку многозначный нелинейный элемент не является стандартным и отсутствует в библиотеке SIMULINK 6.1, воспользуемся блоком «S-Function» для его описания в соответствие с

блок-схемой (рис. 5). Текст программы для реализации нелинейного звена написан на встроенном в MATLAB языке программирования М-файлов.

Для моделирования работы нелинейного блока используем структурную схему, приведенную на рис. 6. Блок «Sine Wave» служит для задания сигнала синусоидальной формы (частота $f=200$ Гц, амплитуда $U=1$ В); блок «Ramp» – для задания линейно возрастающего сигнала (возрастание напряжения от нуля со скоростью 0,05 В/с); блок «Product» производит перемножение двух сигналов; блок «Scope» служит для построения временных разверток сигналов; блоки «x2» и «y2» используются для записи данных в соответствующие массивы и последующего построения фазовых портретов.

При подаче на вход нелинейного звена периодического сигнала с возрастающей амплитудой (рис. 7, а), рабочая точка совершает колебания по оси абсцисс относительно начала координат (рис. 4). При этом частота и амплитуда колебаний подобраны таким образом, что рабочая точка проходит поочередно по всем возможным траекториям пяти ближайших участков нелинейности. Временные диаграммы и фазовый портрет работы схемы представлены на рис. 7, б и в, соответственно ($z=4800$, время расчета $t=0,1$ с, шаг расчета $t^*=10^{-5}$ с). Полученная в результате моделирования характеристика нелинейности (рис. 7, в) адекватна характеристике многозначной статической нелинейности, приведенной на рис. 4.

Проведем моделирование работы контура ФАПЧВ (рис. 3). Компьютерная модель электропривода с фазовой синхронизацией приведена на рис. 8, где k – коэффициент усиления корректирующего устройства ($k=1$); T_d – постоянная времени корректирующего устройства; e_m – максимальное угловое ускорение вала электропривода; блоки «BDPT» и «ICHFD» моделируют соответственно передаточные функции бесконтактного двигателя постоянного тока и интегратора, входящего в состав ИЧФД. Начальные значения для ошибок по угловой скорости $\Delta\omega$ и по углу $\Delta\alpha$ задаются начальными условиями интеграторов блоков «BDPT» и «ICHFD» соответственно.

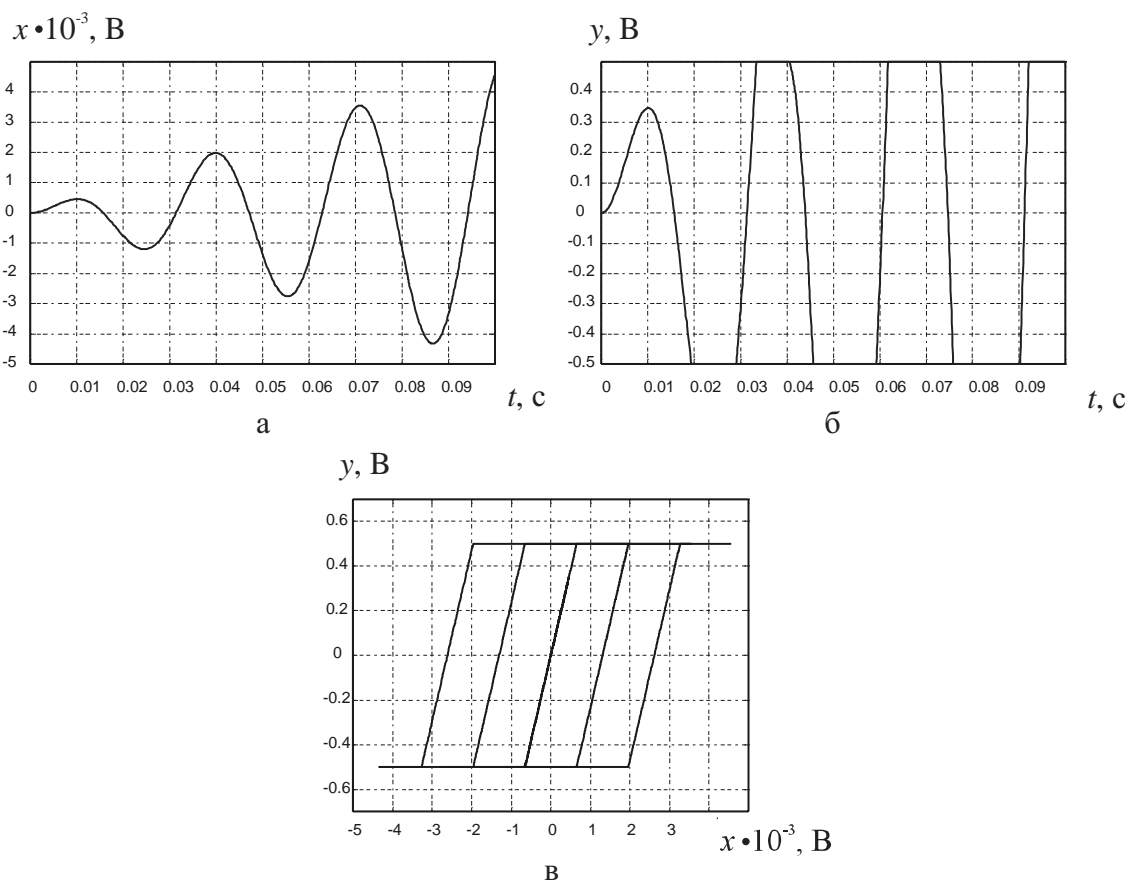


Рис. 7. Временные диаграммы и фазовый портрет работы модели многозначной статической нелинейности

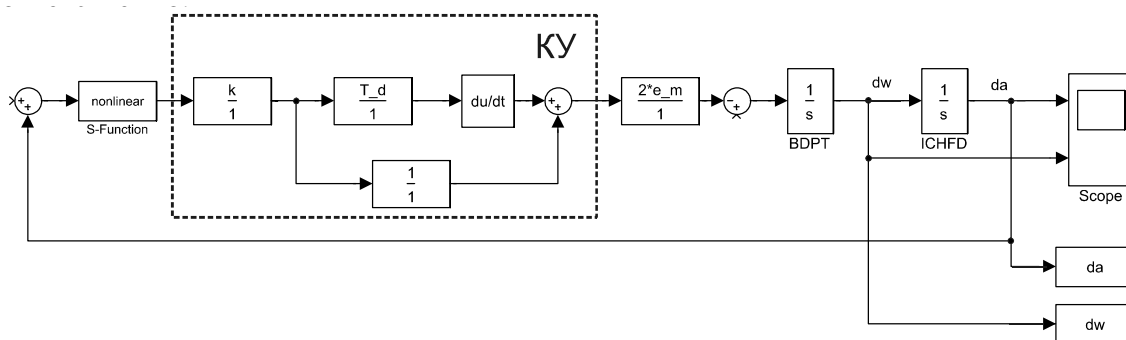


Рис. 8. Модель электропривода с фазовой синхронизацией

При моделировании работы электропривода с фазовой синхронизацией были заданы параметры $\zeta=4800$, $\varepsilon_m=10 \text{ с}^{-2}$, $k=1$, $T_\theta=16,2 \text{ мс}$ (значение постоянной времени КУ соответствует критическому переходному процессу [5]), время расчета $t=0,1 \text{ с}$, шаг расчета $t'=10^{-5} \text{ с}$. Временные диаграммы и фазовые портреты работы контура ФАПЧВ при нулевом начальном значении угловой ошибки ($\Delta\alpha_0=0$) и различных начальных значениях ошибки по угловой скорости представлены на рис. 9.

Фазовые портреты работы электропривода при ненулевых начальных значениях угловой ошибки представлены на рис. 10. Фазовая траектория, соответствующая режиму разгона электропривода с максимальным ускорением (насыщение ИЧФД) с

последующим переходом в пропорциональный режим работы (разблокировка ИЧФД) и синхронизацией в точке минус $4\varphi_0$ представлена на рис. 10, а, ($\Delta\omega_0=-0,2 \text{ рад/с}$, $\Delta\alpha_0=5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$). На рис. 10, б, ($\Delta\omega_0=0,15 \text{ рад/с}$, $\Delta\alpha_0=8 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$) показана фазовая траектория, соответствующая режиму торможения электропривода с максимальным ускорением с последующим переходом в пропорциональный режим работы и синхронизацией в точке $6\varphi_0$.

Выводы

1. При построении компьютерной модели электропривода с фазовой синхронизацией в программе MATLAB использована полная струк-

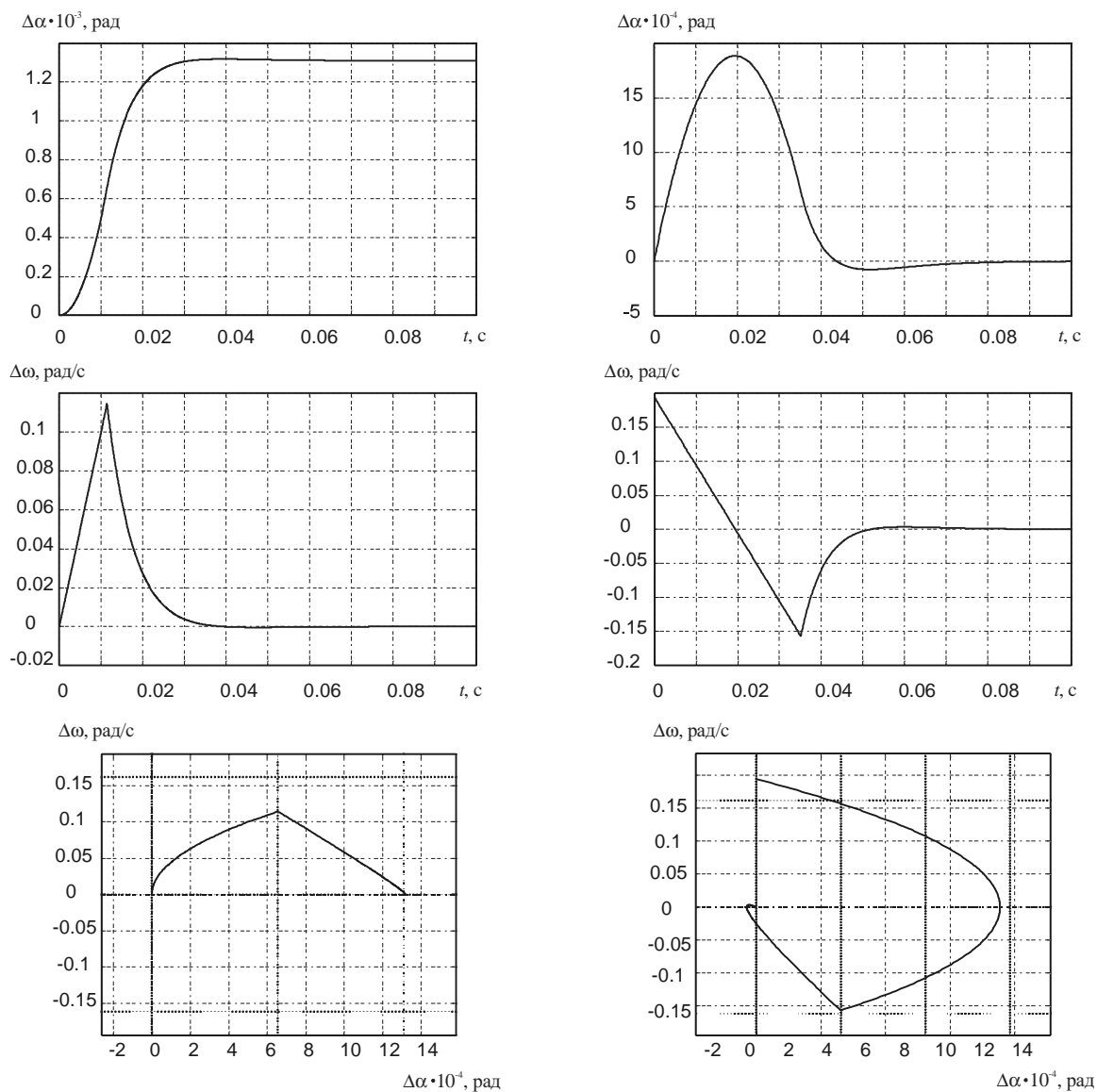


Рис. 9. Временные диаграммы и фазовые портреты работы электропривода с фазовой синхронизацией ($\Delta\alpha_0=0$)

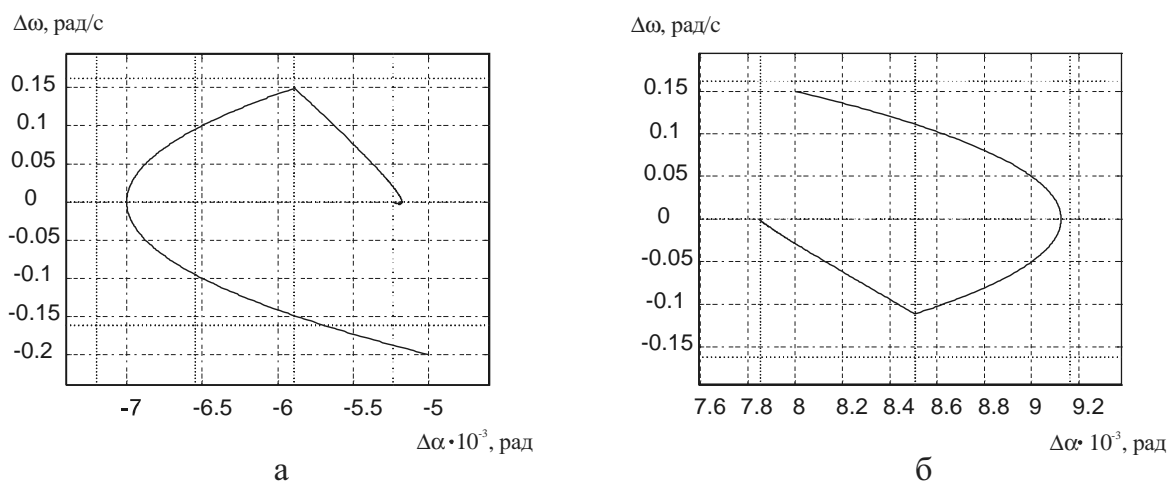


Рис. 10. Фазовые портреты работы электропривода с фазовой синхронизацией

- турная схема контура ФАПЧВ с учетом всех его нелинейностей.
2. Разработан специальный SIMULINK-блок, моделирующий работу многозначной статической нелинейности, которая входит в состав модели импульсного частотно-фазового дискриминатора.
 3. Проведено моделирование электропривода с фазовой синхронизацией в переходных режимах работы при различных начальных условиях,

получены временные зависимости и фазовые портреты работы электропривода, что позволяет определить время регулирования и величину перерегулирования в контуре ФАПЧВ, а также наглядно демонстрирует форму и характер переходного процесса.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании прецизионных электроприводов с фазовой синхронизацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.
2. Бубнов А.В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянного тока. – Омск: Редакция журнала «Омский научный вестник», 2005. – 190 с.
3. Бубнов А.В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 27–31.
4. Катрич П.А., Игнатов А.С. Блок «Многозначная нелинейность». – М.: ВНИИЦ, 2005. – № 50200501804.
5. Бубнов А.В., Катрич П.А. Вопросы выбора регулятора для следящего электропривода с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. – 2005. – № 2. – С. 128–131.

УДК 519.688

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ОПЕРАЦИИ «СЖАТИЕ-РАСТЯЖЕНИЕ», ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БИОИНДИКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Ю.В. Волков, В.А. Тартаковский*, В.Н. Попов, И.А. Ботыгин

Томский политехнический университет

E-mail: yvolkov@tpu.ru

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: tv@iom.tomsknet.ru

Рассматривается способ восстановления фазы сигнала, основанный на численном алгоритме, реализующем операцию «сжатие-растяжение», используемый при выделении биоиндикационной информации. Приведены результаты численного исследования предлагаемого алгоритма.

Введение

Биоиндикационное исследование часто основывается на анализе слоистых или кольцевых структур биообъектов [1]. Информация, содержащаяся в картине чередующихся полос разной интенсивности, может быть использована для восстановления связи между биологическим объектом и окружающей средой. Восстановление закодированной подобным образом информации предлагается осуществлять путем вычисления фазы сигнала, представляемого в виде колебательного процесса [2]. В результате реализации данного подхода получают информацию об особенностях изменений локальной структуры индикатора. Точность восстановления информации зависит от уровня и вида составляющих шума, содержащихся в смеси с анализируемым сигналом. Применяя процедуры фильтрации, как во временной, так и в частотной областях добиваются требуемой точности вычисления фазы. В то же время, для сигналов с широким спектром частот ошибка восстановления фазы связана с отсутствием аналитичности.

Введение аналитического сигнала (АС), позволяет однозначным образом определить амплитуду, фазу и частоту любой вещественной функции времени [3–6]. Наиболее важное свойство аналитического сигнала – это причинность его спектра. Спектр АС располагается по одну сторону от начала координат оси частот [7], т.е. АС, соответствующий действительной функции, получается путем обнуления одной половины спектра частот. Эта операция непротиворечива только в том случае, когда сигнал сформирован как двухполосный, как сумма сопряженных комплексных функций с непересекающимися спектральными полосами. Эти комплексные функции будут по определению сопряженными аналитическими сигналами. Качественный признак наличия двухполосности – это большое число мало меняющихся периодов у колебания, но при наличии шума трудно сделать вывод о выполнении данного требования.

Решение данной проблемы возможно с использованием операции «сжатия-растяжения» сигнала во