



**Всероссийская  
научная конференция**

**30 июня - 2 июля 2005 г.**

---

**УПРАВЛЕНИЕ  
И  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**  
*УИТ-2005*

***Сборник докладов  
в 2-х томах***

**Санкт-Петербург  
2005**

<i>Кулагин В.Н., Лепетаев В.В., Рубан Н.В.</i> Микропроцессорная система управления измерительного комплекса радара некогерентного рассеяния ...	175
<i>Деревянов М.Ю., Лившиц М.Ю., Липкинд В.Я.</i> Оптимальное управление процессом цементации шестерен по системным критериям.....	178

**НАПРАВЛЕНИЕ III. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ  
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

*Секция 2. Сложные информационные системы*

<i>Озерова И.Г., Цапко Г.П.</i> Эффективность внедрения корпоративных информационных систем .....	186
<i>Титов Г.С.</i> Построение мультиагентной корпоративной системы поддержки принятия решений на примере кредитной организации .....	191
<i>Казаринова В.Л., Попова О.В., Шнайдер Д.А.</i> Идентификация эффективных производственных характеристик в АСУ ТП с использованием граничных оценок .....	199
<i>Фролова М.С.</i> Телемедицинские системы на основе ISDN-технологий .....	206
<i>Тягунов О.А.</i> Компьютерная обучающая среда по теории автоматического управления.....	211
<i>Жаркова Г.А.</i> Математические модели управления качеством учебных достижений.....	214
<i>Ионов Ю.Г., Лохин В.М.</i> О спецкурсе "Управление сложными динамическими объектами" для аспирантов специальности 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации" .....	220

**НАПРАВЛЕНИЕ III. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ  
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

*Секция 3. Синергетические системы управления*

<i>Бокатая О.Н.</i> Синергетическое управление многодвигательным электроприводом системы транспортировки и обработки гибких материалов .....	229
<i>Борисова С.С.</i> Синергетический синтез нелинейных адаптивных регуляторов для управления одноосными силовыми гиросtabilизаторами.....	235
<i>Ионов Ю.Г., Пархоменко А.С.</i> Некоторые особенности исследования устойчивости систем с электродуговым плазмотроном .....	239
<i>Кобзев В.А.</i> Новое синергетическое направление решения нелинейной проблемы управления движением гидросамолетов.....	246
<i>Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю., Цуканов В.Г.</i> Исследование устойчивости математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	250
<i>Никитин А.И.</i> Синергетический синтез «безопасных» законов управления взлетом и посадкой гидросамолета.....	257
<i>Мушенико А.С.</i> Синергетический автопилот продольного движения для беспилотного летательного аппарата.....	263

В настоящее время на стенде ТАНТК проведены модельные исследования синергетической системы управления гидросамолетом Бе-200 для разных параметров морского волнения. Эти первоначальные результаты подтверждают в целом эффективность синергетического метода управления движением ГС.

По результатам моделирования при фиксированной фазе волны при различных уровнях волнения наблюдается существенное улучшение характеристик движения, в том числе снижается вертикальная перегрузка, уменьшается амплитуда колебаний угла тангажа и др. Разумеется, что для конкретных выводов необходимо продолжение исследований, заключающихся в проведении большего числа экспериментов с разными параметрами морского волнения для разных версий синергетических законов управления. Однако уже сейчас можно утверждать, что синергетический подход открывает принципиально новые перспективы в решении сложной нелинейной проблемы управления движением гидросамолетов различных классов.

#### Список литературы

1. Кобзев В.А. Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева — день сегодняшний и перспективы //Авиационное приборостроение, 2004, № 8.
2. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Современные направления синтеза систем автоматического управления ЛА //Известия РАН. Теория и системы управления, 2004, № 2.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
4. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Москва-Таганрог: Изд-во ТРТУ, Ч. II, 2000.

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Ю.В. Колоколов, А.Ю. Мелихов, В.Г. Цуканов

Орловский Государственный Технический Университет

**Введение.** Теория автоматического управления основным объектом своего анализа имеет в целом эволюционные системы. При этом на описательном уровне под последними понимают технические, физические, биологические, экологические и любые иные системы, для которых изучаются изменения, протекающие в них с течением времени.

Наиболее часто встречающиеся классы эволюционных систем следующие:

- непрерывные системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями;

- дискретные системы, описываемые конечно-разностными уравнениями;
- системы с распределенными параметрами, описываемые эволюционными уравнениями в частных производных (например, уравнения теплопроводности, колебаний, гидродинамики);
- системы с последействием, для описания которых используются функционально-дифференциальные уравнения. В этом случае протекание процесса определяется не только состоянием системы, но также и предысторией процесса;
- стохастические системы. Стохастической системой может быть любая из вышеперечисленных систем для описания процессов в которой необходимо прибегать к понятиям и методам теории вероятностей.

При рассмотрении различных практических задач управления существенную роль играет проблема устойчивости. Под устойчивостью обычно понимают свойство системы или какого-либо состояния сохраняться при малых изменениях начальных условий, внешних воздействий, параметров системы и т.д. [2]. В связи с этим следует подчеркнуть, что решение проблемы устойчивости системы автоматического управления тем или иным объектом – это удовлетворение базового требования к функционированию любой технической системы.

Особую актуальность указанная задача приобретает в различных системах преобразования энергии, входящих в состав технологических процессов, в которых потеря устойчивости может повлечь человеческие жертвы, существенные материальные убытки или отрицательное воздействие на окружающую среду.

Основная проблема, возникающая при анализе устойчивости реальных объектов, заключается в том, что, как правило, последние описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений (СДУ) выше третьего порядка, что приводит к необходимости использования методов нелинейной динамики, нелинейной теории управления совместно с методами численного анализа. Ярким примером такого объекта является асинхронный двигатель (АД), который входит в состав многих энергетических систем и по разным оценкам [3,7] потребляет от 65% до 82% от всего объема электроэнергии. Кроме того, развитие асинхронного электропривода (АЭП) в настоящее время является приоритетным направлением ЗАО «Электротекс» (г. Орел), чем обусловлен повышенный интерес к исследованию динамики АД в составе

систем плавного пуска и систем векторного управления в совместной лаборатории «Силовая электроника» ЗАО «Электротекс» – Орел ГТУ.

Целью данной статьи является исследование устойчивости асинхронного двигателя с учетом нагрузки на валу ротора для определения наличия и расположения областей нестационарной динамики в фазовом пространстве его модели.

**Математическая модель асинхронного двигателя.** Использование ряда традиционных допущений [3,8] позволяет отнести АД с короткозамкнутым ротором к классу непрерывных динамических систем.

Математическая модель такого объекта, построенная на базе Т-образной схемы замещения, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений 14-го порядка, которую, воспользовавшись преобразованием Кларка, можно упростить, сведя к системе 5-ого порядка [3,8]. Эта система уравнений, записанная через потокосцепления обмоток в системе координат  $\alpha$ - $\beta$ , жестко связанной со статором имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sa}}{dt} = u_{sa}(t) - \alpha_s \psi_{sa} + k_s \alpha_s \psi_{ra}; \\ \frac{d\psi_{sb}}{dt} = u_{sb}(t) - \alpha_s \psi_{sb} + k_s \alpha_s \psi_{rb}; \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} = -\alpha_r \psi_{ra} + k_r \alpha_s \psi_{sa} - p\omega_r \psi_{rb}; \\ \frac{d\psi_{rb}}{dt} = -\alpha_r \psi_{rb} + k_r \alpha_s \psi_{sb} + p\omega_r \psi_{ra}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_z} \left[ \frac{3pk_r}{2\sigma L_s} (\psi_{sb}\psi_{ra} - \psi_{sa}\psi_{rb}) - M_c \right], \end{cases} \quad (1)$$

где  $\psi_{sa}(\psi_{ra}), \psi_{sb}(\psi_{rb})$  – проекции вектора потокосцепления статора (ротора) на оси системы координат  $\alpha$ - $\beta$ ;  $\alpha_s(\alpha_r), k_s(k_r)$  – коэффициенты затухания и связи статора (ротора);  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $u_{sa}(t), u_{sb}(t)$  – двухфазное напряжение статора, полученное посредством прямого преобразования Кларка из трехфазного;  $\omega_r$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $J_z$  – суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $L_s$  – индуктивность статора, Гн;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $M_c$  – статический момент на валу.

Рассматривая модель АД как динамическую систему, следует указать, в каких диапазонных могут изменяться ее параметры. В первом приближении можно выделить четыре параметра, которые имеют наиболее широкий диа-

пазон изменения относительно своего номинального значения. Два из них относятся к управляемым параметрам это:

1  $U_m$  – амплитуда напряжения питания АД может принимать значения от 0 до номинального –  $U_m \in [0; U_n^*]$ ;

2  $f$  – частота напряжения питания принимает значения от 0 до номинального –  $f \in [0; f_n]$ ;

Два других параметра входят к группу неуправляемых параметров (возмущений):

3  $x_m$  – сопротивление взаимной индуктивности между статорной и роторной обмотками АД при управлении может изменяться в диапазоне  $\pm 50\%$  от номинального значения –  $x_m \in [0.5 x_n^*; 1.5 x_n^*]$ ;

4 Суммарный момент инерции электропривода включает

$$J_{\Sigma} = J_{IM} + J_{Load}, \quad (2)$$

где  $J_{IM}$  – собственный момент инерции АД;  $J_{Load}$  – момент инерции нагрузки.

ГОСТ устанавливает предельно допустимый момент инерции приводимого механизма, отнесенный к валу АД, который согласно /6/ следует определять по формуле:

$$J_{Load}^{max} = k k_m P_{2ном}^{\nu} P^{\gamma}, \quad (3)$$

где  $P_{2ном}$  – номинальная мощность АД (кВт);  $p$  – число пар полюсов АД;  $k$ ,  $k_m$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$  – эмпирические коэффициенты, определяемые в зависимости от типа нагрузки, серии АД, высоты оси вращения. Выберем для анализа нагрузку «вентиляторного» (насосного) типа с функциональной зависимостью вида:

$$M_c = k_n (\omega_r)^2,$$

где  $k_n$  – коэффициент, определяющий наклон характеристики. Коэффициент  $k_n$  соответствует номинальному моменту для частоты 50 Гц отнесенному к квадрату синхронной скорости АД на этой частоте.

Тогда, к примеру, для АД серии 4А 4А225М4У3 (с номинальной мощностью  $P_{2ном} = 55$  кВт)  $k=0.045$ ;  $\nu=1$ ;  $\gamma=2$ ,  $k_m=0.85$  /6/. Подставляя указанные коэффициенты в (3), получим, что  $J_{Load}^{max} = 8.415$  (кг·м<sup>2</sup>). При собственном моменте инерции АД 4А225М4У3  $J_{IM} = 0.621$  (кг·м<sup>2</sup>) максимальный суммарный момент электропривода согласно уравнения (4) составит:

$$J_{\Sigma} = J_{IM} + J_{Load}^{max} = 9.036 \text{ (кг·м}^2\text{)}.$$

Полученное значение приблизительно в 14.5 раз превышает собственный момент инерции АД из чего можно сделать заключение о возможных границах варьирования момента инерции при анализе устойчивости.

Таким образом, в модели исследуемого объекта определен вектор переменных состояния  $x = (\psi_{sm}, \psi_{rm}, \psi_{sb}, \psi_{rb}, \omega_r) \in R^5$  и вектор параметров  $\alpha = (U_n, f, x_n, J_\Sigma) \in R^4$ . Оператор эволюции задан системой (1), представляющей собой нелинейную систему автономных обыкновенных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами перед переменными.

**Анализ устойчивости модели АД. Особенности применения численного алгоритма вычисления старшего ляпуновского показателя (СЛП).** Для численного анализа устойчивости динамических систем высокого порядка широкое распространение получил метод построения карты распределения СЛП на плоскости параметров системы [4,5].

Известно, что по изменению знака СЛП можно зафиксировать состояние, при котором в системе происходит бифуркационный процесс с качественным изменением характера динамики. Классический алгоритм вычисления СЛП был предложен группой исследователей (Benettin G., Galgani L., Strelcyn J.-M.) в 1976 г. и получил название *алгоритма Бенеттина* [6]. Основные этапы этого алгоритма следующие:

- 1 провести численное решение динамических уравнений на интервале времени, достаточном для выхода траектории на аттрактор. Точка  $x_0$ , лежащая на аттракторе системы, принимается за исходную;
- 2 выбрать время расчета СЛП ( $T$ ), сопоставимое с постоянной времени исследуемой системы и достаточное для статистического усреднения СЛП на этом интервале;
- 3 разбить выбранный интервал  $T$  на  $M$  частей  $t = (t_1, t_2 \dots t_M)$ ;
- 4 выбрать возмущение  $\varepsilon$ .  $\varepsilon$  — это величина, на которую будут отличаться исходная и возмущенная траектории;
- 5 провести численное решение исходной системы с начальными условиями  $x_0$ , возмущенными на величину  $\varepsilon$  ( $\|x_0 + \tilde{x}_0^0 - x_0^0\| = \varepsilon$ ), на интервале  $t_1$ . Получить величину возмущения вектора состояния в момент  $t_1 - \tilde{x}(t_1) = \tilde{x}_1$ ;
- 6 зафиксировать величину отношения  $\|\tilde{x}_1\|/\varepsilon$ , характеризующую изменение нормы вектора возмущения за время  $t_1$ ;
- 7 переопределить возмущенный вектор так, что бы его направление осталось тем же, а норма стала равна исходному значению  $\varepsilon$ :  $\tilde{x}_1^0 = \tilde{x}_1 / \|\tilde{x}_1\|$ ;

8 повторить пункты 5 – 7  $i$  раз ( $i = \overline{2..M}$ ) с фиксированием отношения  $\|\tilde{x}_i\|/\varepsilon$ .

По окончании выполнения описанного алгоритма, при достаточно большом  $M$ , СЛП можно будет оценить по формуле [6]:

$$\Lambda = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^M \ln \left\| \frac{\tilde{x}_i}{\varepsilon} \right\|.$$

Применяя описанный выше алгоритм к различным динамическим системам, вскрываются некоторые особенности его использования. В частности, в случае анализа модели АД, последовательно изменяя параметры системы в установленных выше диапазонах с некоторым шагом, каждый раз получается различное время выхода на аттрактор, изменяющееся в достаточно широком диапазоне. При этом, если априорно выбрать это время таким, чтобы можно было перекрыть время регулирования, порождаемое любым возможным сочетанием исследуемых параметров, то итоговое время построения карты распределения СЛП оказывается неприемлемо большим. К примеру, для получения 1000 точек трехмерной карты в плоскости параметров  $(U_m, f, J_\Sigma)$  при фиксированном  $x_m$  требуется затратить порядка 27 часов на компьютере класса Pentium 4 3 ГГц с 1 Гб оперативной памяти. Очевидно, что столь большое время проведения анализа создает известные трудности для исследования и является недостатком используемого алгоритма, который можно отчасти устранить путем формирования функциональной зависимости, связывающей параметры  $(U_m, f, J_\Sigma)$  с временем регулирования  $t_{reg} = f(U_m, f, J_\Sigma)$  (временем выхода на аттрактор). Попытки использовать для аппроксимации этой зависимости полиномы вплоть до четвертого порядка не дали приемлемых результатов по точности. В связи с этим было принято решение об использовании возможностей теории нечеткой логики для обучения и внедрения в программу расчета СЛП алгоритма нечеткой аппроксимации, реализованного в среде «MatLab 6.5»<sup>®</sup>. При этом время расчета удалось сократить более чем в два раза.

**Получение нестационарных областей в динамике АД.** Получение карты СЛП проводилось для трех значений главного индуктивного сопротивления  $x_m$ :  $x_m^{\min} = 0.5 x_m^*$ ;  $x_m^*$ ;  $x_m^{\max} = 1.5 x_m^*$  (АД 4A225M4У3). Прочие, выбранные для анализа параметры  $(U_m, f, J_\Sigma)$ , изменялись в указанных выше диапазонах. При этом, после предварительного получения 1000 точек для всего диапазона изменения параметров был проведен анализ в более узком



диапазоне, в котором по результатам первого этапа выявлена нестационарная область.

Проведенный анализ показал, что в динамике модели АД существует область на границе которой происходит качественное изменение характера динамических процессов (изменение формы аттрактора), т.е., появление движений, несовместимых с условиями нормальной эксплуатацией исследуемого объекта. На рис. 1 приведена такая область для  $x_m = x_m^n$ . При попадании исследуемых параметров в затемненное пространство (рис. 1) возникают незатухающие колебания угловой частоты вращения ротора АД (рис. 2.а) – это соответствует обращению в нуль собственных чисел матрицы линеаризации стационарного решения системы уравнений (1), т.е. реализуется бифуркация коразмерности 1, получившая название «бифуркации Андронова-Хопфа» [1].

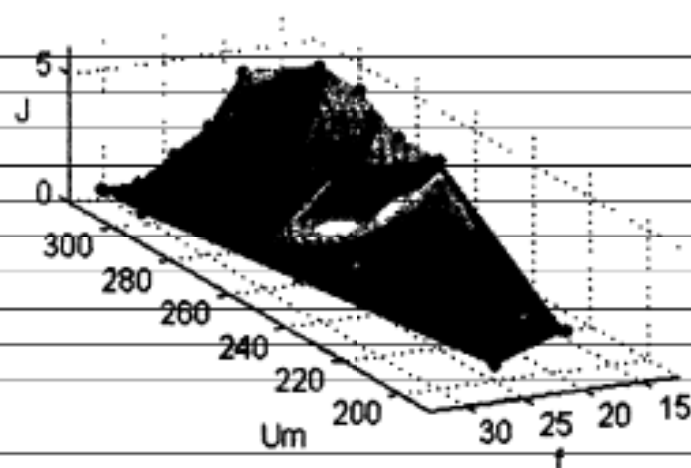


Рис. 1 – Область периодической динамики модели АД при  $x_m = x_m^n$

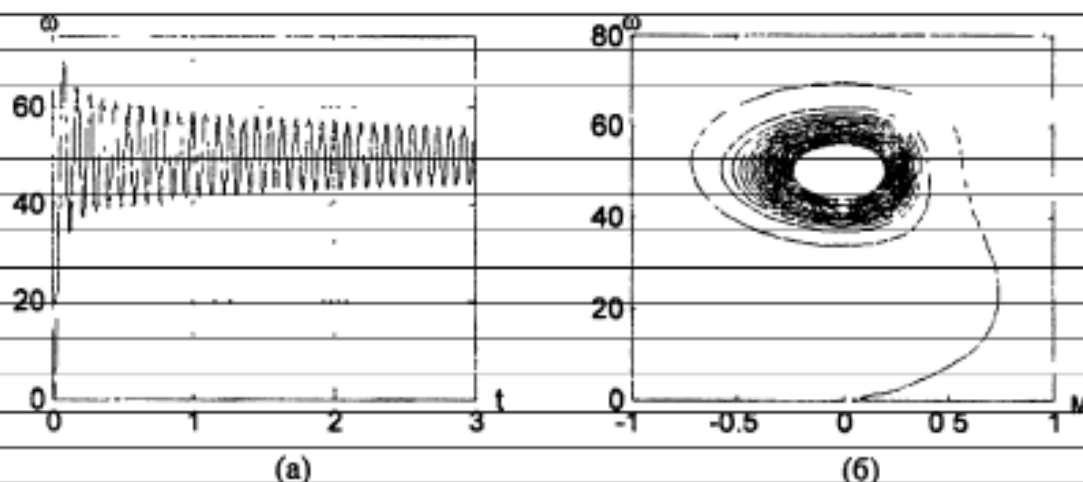


Рис. 2 – Появление автоколебаний угловой скорости вращения ротора в модели АД  
(а) с аттрактором типа «устойчивый узел»  
(б) при попадании исследуемых параметров в критическую область

**Заключение.** Модификация алгоритма Бенеттина посредством внедрения в программу расчета СЛП аппроксимации функциональной зависимости  $t_{reg} = f(U_n, f, J_T)$ , основанной на теории нечеткой логики, позволила реализовать алгоритм, требующий меньших временных затрат, и исследовать трехмерные карты СЛП динамической модели АД. Анализ полученных карт показал, что в диапазоне средних частот напряжения питания АД (16 – 31 Гц) и в диапазоне амплитуд напряжений питания выше средних (200 – 312 В), существует область, в которой СЛП близок к нулю. При попадании анализируемых параметров в эту область в модели АД возникают незатухающие периодические колебания угловой частоты вращения ротора, которые можно рассматривать как аварийные для многих технологических процессов. При проектировании как разомкнутых, так и замкнутых по скорости систем управления асинхронным двигателем, следует учесть влияние найденной области на устойчивость системы асинхронного электропривода в целом.

#### Список литературы

- 1 Анищенко, В.С. Сложные колебания в простых системах: Механизмы возникновения, структура с свойства динамического хаоса в радиофизических системах. / В.С. Анищенко. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 312 с.
- 2 Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 614 с.
- 3 Коньлов, И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов / И.П. Коньлов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002 – 607 с.
- 4 Кузнецов, С. П. Динамический хаос (курс лекций) / С. П. Кузнецов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001 – 296 с.
- 5 Мун, Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990 – 312 с.
- 6 Радии, В.И. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / В.И. Радии. СПб: С.-Петербург, 2002 – 546 с.
- 7 Michael A. Merkle, Amir M. Miri “Modeling of Industrial Loads for Voltage Stability Studies in Power Systems”, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 6, №2. – April 2003. p 728 – 734
- 8 Novotny, D.W. Vector Control and Dynamics of AC Drives / D.W. Novotny, T.A. Lipo. Oxford: Clarendon press, 2003 – 440 p.

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ «БЕЗОПАСНЫХ» ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗЛЕТОМ И ПОСАДКОЙ ГИДРОСАМОЛЕТА

А.И. НИКИТИН

Таганрогский государственный радиотехнический университет

К 2017-20 гг. в мире ожидается трехкратное увеличение объема авиане-  
ревозок. В связи с этим, при сохранении существующей сейчас статистики