

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

АДМИНИСТРАЦИЯ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОЮЗ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ГОСУДАРСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ  
ТЦ «ОРЕЛГЕОМОНИТОРИНГ»

ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

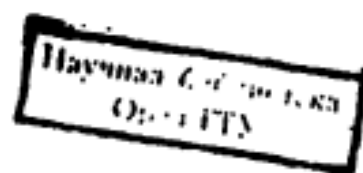
**МЕТОДЫ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ  
В ТЕХНИКЕ, ЭКОНОМИКЕ И ЭКОЛОГИИ**

**МАТЕРИАЛЫ**

**ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**15-17 ноября 2004 г.**

**ОРЁЛ 2004**



10854/04/04

ИЗМАЛКОВА С.А., БАТИШЕВ А.В. ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ С УЧЕТОМ ИННОВАЦИОННОГО ПУТИ РАЗВИТИЯ ЕДИНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИИ .....	78
ИЗМАЛКОВА С.А., БАТИШЕВ А.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМЫ ЕДИНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИИ ПУТЕМ ЗЕРКАЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРНЕТ-САЙТОВ.....	80
КАЛАШНИКОВА Е.В. РЕШЕНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ МАТЕМАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	82
КОЗЕЛ \ О. ВЫБОР MATLAB 6.X ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ .....	86
КОЛЕСНИЧЕНКО Л.В. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА МАССИВОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СРЕДЕ LABVIEW.....	90
КОРЕНЕВ М.Н. ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ.....	94
КОРНЕЕВ Е.Ф., ВЕТОХИН Р.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ .....	98
КОСЧИНСКАЯ Е.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ДВИЖУЩЕМСЯ МАТЕРИАЛЕ .....	102
КОСЧИНСКИЙ С.Л., РОМАНОВ А.В., РЕТИНСКИЙ С.Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ГАИОННЫХ РЕЖИМАХ .....	106
ЛОБАНОВА В.А., ВОРОНИНА О.А., АБАШИН В.Г. ПРИМЕНЕНИЕ WWW-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТРЕНИНГ СИСТЕМЫ УСТАНОВОК ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ.....	110
ЛОБАНОВА В.А. ТЕОРЕТИКО – МНОЖЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ОБЪЕКТОВ И ФОРМИРОВАНИЮ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	114
ЛОБАНОВА В.А., АБАШИН В.Г. К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ДНЯ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА .....	118
ЛОБАНОВА В.А., АБАШИН В.Г. АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА КАК ОБЪЕКТА С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ТИПОМ ЗАНЯТИЙ И КАТЕГОРИЕЙ ТЯЖЕСТИ.....	120
ЛОБАНОВА В.А., ВОРОНИНА О.А. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ АСУТП УСТАНОВОК ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ.....	122
ЛОБАНОВА В.А., ВОРОНИНА О.А. ПРИМЕНЕНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В УСТАНОВКАХ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ.....	125
МЕЛИХОВ А.Ю., ЦУКАНОВ В.Г., КОЛОКОЛОВ Ю.В. УСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ .....	127
МОЛОВА А.В. РЕАЛИЗАЦИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ В ДИНАМИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В MATLAB 6.X .....	131

## УСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

*Мелихов А. Ю., аспирант каф. «ИТЭиВС»,*

*Цуканов В. Г., студент гр. «41-Р».*

*Колоколов Ю. В., доктор технических наук, проф., зав. каф. «ИТЭиВС»,*

*Орловский государственный технический университет,*

*г. Орел, тел: 7 0862 419879, e-mail: science-orel@omn.ru*

Устойчивость как свойство системы или какого-либо ее состояния сохраняться при малых изменениях начальных условий, внешних воздействий, параметров системы и т.д. /1/ всегда являлось центральной характеристикой систем управления. В последнее время обеспечение устойчивости является первоочередной задачей и, к примеру, при разработке оптимальных систем управления, в первую очередь, обеспечивается требуемый запас устойчивости, а уже затем достигается тот или иной критерий качества.

Анализ устойчивости асинхронного двигателя (АД), как объекта управления, сопряжен с рядом проблем, связанных, прежде всего, с высоким порядком системы дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель (ММ) АД.

В существующей литературе вопросы об устойчивости, как ММ АД, так и ММ систем управления асинхронным двигателем, обсуждаются вскользь, в основном с применением частотных критериев к передаточным функциям линеаризованной приведенной двухфазной модели АД /2/. Этот подход предполагает использование приема приведения многофазного АД к эквивалентной двухфазной модели посредством введения обобщенного вектора с последующей записью полученных уравнений во вращающейся системе координат (СК)  $(d-q)$  /3,4,5/. В такой системе периодические переменные (напряжения, токи, потокосцепления и т.д.) представляются константами. например, напряжение, прикладываемое к статорным обмоткам АД, в СК  $d-q$  имеет вид:  $u_{sd} = 0$ ,  $u_{sq} = -U_m$  (здесь  $U_m$  – амплитуда линейного напряжения сети). Очевидно, что, используя такой подход, фактически невозможно учесть несинусоидальность напряжения, подаваемого на статорные обмотки АД при питании, к примеру, от тиристорного регулятора напряжения.

С другой стороны, используя традиционные допущения /2,3,4,5/. ММ АД записывается в виде нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) <sup>1</sup>. В этом случае анализ устойчивости связан с

<sup>1</sup> В случае двухфазной модели АД СОДУ имеет пятый порядок, в случае трехфазной модели АД – седьмой порядок.

применением второго метода Ляпунова, предположившего наличие некоторых специальных функций, называемых функциями Ляпунова, но, как известно, построение таких функций для систем высокого порядка весьма затруднено [1, стр. 24].

Таким образом, существует необходимость в разработке и развитии инженерных инструментов исследования устойчивости ММ АД, которые, с одной стороны, будут алгоритмичны, с другой стороны, позволят исследовать устойчивость с учетом нестациональности питающего напряжения, возмущающего по силовому каналу системы управления. Для решения указанной задачи нами предлагается следующий алгоритм.

1. Как известно, математическую модель 3-х фазного АД можно записать в виде следующего матричного уравнения:

$$\Psi = U R_0, \quad (1)$$

где  $\Psi$  - вектор-столбец производных потокоцеплений обмоток статора и ротора по осям СК, связанной со статором АД ( $\alpha - \beta - \gamma$ ),  $U$  - вектор-столбец напряжений,  $R_0$  - квадратная матрица, в которой элементы главной диагонали равны активным сопротивлениям статорной и роторной обмоток АД;  $I$  - вектор-столбец токов, текущих в обмотках АД по соответствующим осям. Уравнение, описывающее электромеханическое преобразование энергии в АД, имеет следующий вид:

$$J \dot{\omega} = M_e - M_m. \quad (2)$$

где  $J$  - суммарный момент инерции АД и момента инерции нагрузки, приведенной к валу ротора;  $\omega$  - угловая скорость АД;  $M_e$  - электромагнитный момент АД;  $M_m$  - статический момент. В непреобразованной СК  $\alpha - \beta - \gamma$  обмотки статора неподвижны, а ротор вращается в положительном направлении с угловой частотой  $\omega_r = p \cdot \omega$  ( $p$  - число пар полюсов двигателя). При переходе к СК  $u - \beta - \gamma$  обмотки статора остаются неподвижными, а ротор затормаживается посредством перехода от вращающейся СК  $\alpha - \beta - \gamma$  к неподвижной  $u - \beta - \gamma$  путем умножения матрицы периодических переменных ротора  $X$  ( $X = \Psi$  или  $X = I$ ) на переходную матрицу  $L$ , т.е.  $X_u = L \cdot X$ . Переход от стационарной СК  $u - \beta - \gamma$  к вращающейся с угловой частотой  $\omega = 2 \pi f$  ( $f$  - частота питающего АД напряжения) системе координат  $u - \beta - \gamma$  осуществляется с помощью переходной матрицы  $L$ . В СК  $u - \beta - \gamma$  ММ АД представляет собой С(О)У с постоянными коэффициентами.

2. Систему уравнений (1-2) в СК  $u - \beta - \gamma$  можно представить в нормальной форме:

$$\dot{X} = f(t, X(t)). \quad (3)$$

где  $X$  - вектор-столбец переменных состояния,  $f(t, X(t))$  - некоторые (в случае АД - нелинейные) функции переменных состояния и времени. По-

лучив систему уравнений (3), можно перейти к решению задачи об устойчивости по периоду приближенно. В этом случае рассмотрим следующую систему уравнений.

$$\dot{X} = A(t)X(t), \quad A(t) = \frac{dI}{dt}, \quad (4)$$

где  $A(t)$  — квадратная матрица  $T$ -периодических непрерывно дифференцируемых на конечном или бесконечном интервале коэффициентов,  $A_0$  — значения переменных состояния в точке, относительно которой производится линеаризация. Согласно предлагаемому алгоритму, значения переменных в точке линеаризации рассчитываются в СК  $\alpha - \beta - \gamma$ , а затем, переход к переменным СК  $\alpha - \beta - \gamma$ , осуществляется посредством переходной матрицы  $I_1$ .

3. Анализ устойчивости системы уравнений (4) можно осуществить с использованием известной теоремы Л. Флюке, которая гласит, что уравнение (4) асимптотически устойчиво, если все его мультипликаторы  $\rho$  лежат внутри единичного круга ( $|\rho| < 1$ ). Если же  $|\rho| \geq 1$ , причем мультипликаторы  $\rho$ , лежащие на единичной окружности ( $|\rho| = 1$ ), имеют простые элементарные делители, то уравнение (4) устойчиво. В остальных случаях уравнение (4) неустойчиво [1,6].

Мультипликаторы  $\rho$  находят из следующего характеристического уравнения:

$$\det[X(\omega) - \rho I_n] = 0, \quad (5)$$

где  $X(\omega)$  — матрица монодромии;  $I_n$  — единичная матрица ( $n=7$  — порядок системы (4)). Некоторая сложность здесь заключается в вычислении матрицы монодромии  $X(\omega)$ , ибо это, по сути, соответствует решению системы уравнений (4). В данном случае, имея систему уравнений порядка выше третьего, для вычисления  $X(\omega)$  следует использовать численные методы (например, метод, описанный в [6]).

В соответствии с приведенным выше алгоритмом проведено исследование устойчивости 3-х фазной модели АД 4Л225М4У3 ( $P_n=55\text{kBt}$ ). На рис. 1 и 2 приведены графики функции  $I - \omega(t)$  (рис. 1.а, 2.а) и комплексная плоскость с мультипликаторами ( $\rho$ ) (рис. 1.б, 2.б) для номинальных параметров АД и неустойчивых параметров соответственно. Анализ приведенных графиков подтверждает справедливость теоремы Л. Флюке.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет исследовать устойчивость математической модели 3-х фазного АД при питании от несинусоидального источника, что подтверждено численным моделированием. В дальнейшем рассмотренный подход может быть использован при анализе устойчивости АД в контуре регулятора, т.е. совместно с системой уравнения

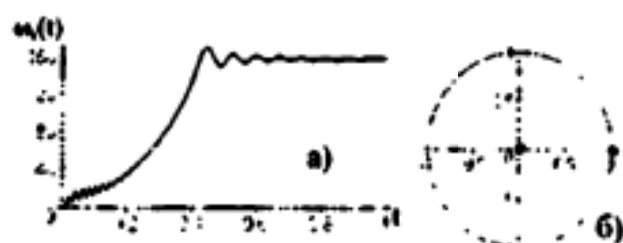


Рисунок 1 – Зависимость  $f = \omega_s(t)$  (а);  $\text{Im}(\rho_s) = f[\text{Re}(\rho_s)]$  (б) при номинальных параметрах АД

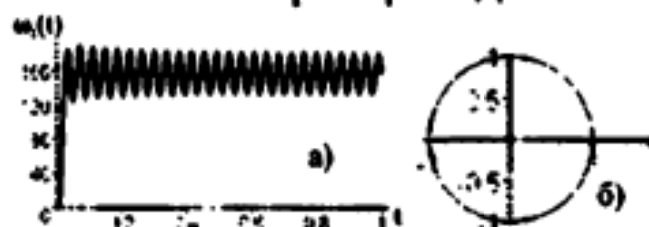


Рисунок 2 – Зависимость  $f = \omega_s(t)$  (а);  $\text{Im}(\rho_s) = f[\text{Re}(\rho_s)]$  (б) при неустойчивых параметрах АД

### Литература

1. 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.
2. Костылев, А. В. Развитие теории и разработка усовершенствованных электроприводов на основе систем «тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель»: дис. ... на соиск. учен. степени канд. тех. на-ук.: 05.09.03 / Костылев А. В. – Екатеринбург, 2000. – 199 с.: ил.
3. Куделько, А. Р. Автоматизированный частотно-регулируемый электропривод с асинхронными двигателями / А. Р. Куделько. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1991. – 196 с.
4. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1994. – 311 с.
5. Глазенко, Т. А. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности / Т. А. Глазенко, В. И. Хрисанов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 176 с.
6. Демидович, Б. П. Лекции по математической теории устойчивости: учеб. пособие / Б. П. Демидович. – 2-е изд. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 480 с.