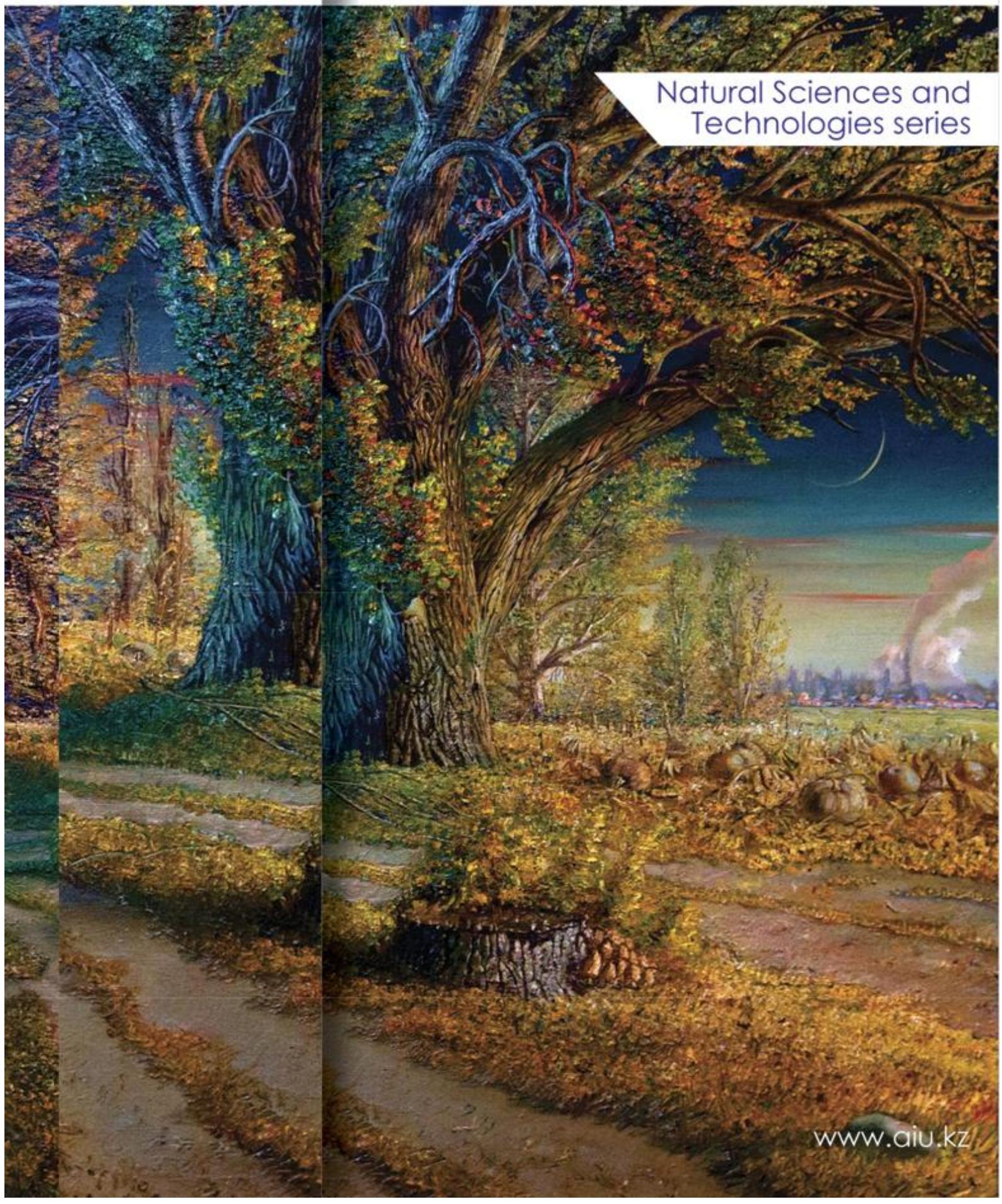


INTERNATIONAL SCIENCE REVIEWS



No.2 (2) 2021



Natural Sciences and
Technologies series



INTERNATIONAL SCIENCE REVIEWS

Natural Sciences and Technologies series

Has been published since 2020

№2 (2) 2021

Nur-Sultan

EDITOR-IN-CHIEF:

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS RK, Professor
Kalimoldayev M. N.

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Doctor of Biological Sciences, Professor
Myrzagaliyeva A. B.

EDITORIAL BOARD:

Akiyanova F. Zh.

- Doctor of Geographical Sciences, Professor (Kazakhstan)
- PhD, (Kazakhstan)
- Candidate of Geographical Sciences, Associate professor (Kazakhstan)

Seitkan A.

Baysholanov S. S

Zayadan B. K.

Salnikov V. G.

Tasbolatuly N.

Urmashev B.A

Abdildayeva A. A.

Chlachula J.

Redfern S.A.T.

Cheryomushkina

V.A.

Bazarnova N. G.

Mohamed Othman

Sherzod Turaev

- Candidate of Physical and Mathematical Sciences, (Kazakhstan)
 - PhD, (Kazakhstan)
 - Professor, Adam Mickiewicz University (Poland)
 - PhD, Professor, (Singapore)
 - Doctor of Biological Sciences, Professor (Russia)
-
- Doctor Chemical Sciences, Professor (Russia)
 - Dr. Professor (Malaysia)
 - Dr. Associate Professor (United Arab Emirates)

Editorial address: 8, Kabanbay Batyr avenue, of.316, Nur-Sultan,
Kazakhstan, 010000
Tel.: (7172) 24-18-52 (ext. 316)
E-mail: natural-sciences@aiu.kz

International Sciense Reviews NST - 76153

International Science Reviews

Natural Sciences and Technologies series

Owner: Astana International University

Periodicity: quarterly

Circulation: 500 copies

CONTENT

С.Е.Базаров СИГОВЫЕ (COREGONIDAE) ВИДЫ РЫБ ВОДОХРАНИЛИЩА БУКТЫРМА.....	5
Г.К.Тарина АНАЛИЗ СОСТАВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЛОДИ РЫБ ПО РЕКЕ ЕРТИС.....	11
Ә.Т.Мазақова, Р.В.Ященко, Т.Ж.Мазаков, Ш.А.Джомартова, В.А.Федоренко ЗООЛОГИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН.....	16
М.Н.Калимолдаев, А.А.Абдилаева ГЛОБАЛЬНЫЙ МЕТОД АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ.....	27

ГЛОБАЛЬНЫЙ МЕТОД АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ

М.Н. Калимолдаев А.А.Абдилдаева

Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК;
e-mail: mnk@ipic.kz

Аннотация: В статье рассматривается исследование и разработка математической модели сложных электроэнергетических систем для задач глобальной асимптотической устойчивости, описываемых дифференциальными уравнениями, правые стороны которых являются периодическими в угловой координате. Получены условия глобальной асимптотической устойчивости нелинейных систем управления. Приведен пример, иллюстрирующий применение полученных результатов и демонстрирующий процедуры изучения глобальной асимптотической устойчивости энергетических систем. Исследована математическая модель сложных электроэнергетических систем для задач глобальной асимптотической устойчивости, описываемых дифференциальными уравнениями, правые части которых периодичны по угловой координате. Разработан программный комплекс, реализующий различные подходы к построению устойчивости синхронного генератора. Компьютерное моделирование позволяет анализировать степень влияния параметров системы на устойчивость синхронного генератора. В данной статье представлена новая идея как для глобального контроля асимптотической устойчивости, так и для регулирования напряжения. В исследовании получены условия глобальной асимптотической устойчивости нелинейных систем управления. Рассмотрен численный пример, результаты которого показывают, что нет необходимости увеличивать более чем на 4 шага, так как они одинаково сходятся к нулю. Результаты численного примера были получены в виде графиков. Расчеты производились на примере готовых данных.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; глобальная асимптотическая стабильность; математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Индустриальное развитие современного общества приводит к постоянному росту потребления электроэнергии [1]. Для удовлетворения этих постоянно растущих потребностей создаются сложные электроэнергетические системы.

В современной электроэнергетике в некоторых странах, с высоким уровнем износа и недостаточной модернизацией оборудования, этот вопрос стоит еще острее [1,14,21]. Помимо необходимости модернизации в электроэнергетике некоторых стран, требуется оценить эффективность использования современного оборудования и условия его нормальной эксплуатации. Процесс создания единой электроэнергетической системы в Казахстане формировался в несколько этапов: от объединения нескольких изолированных электростанций друг с другом для

параллельной работы до формирования территориальной интегрированной электроэнергетической системы крупных промышленных территорий и объединения интегрированной электроэнергетической системы друг с другом для создания единой электроэнергетической системы (ЭЭС) [2,9,11]

Актуальность проблемы поддержания устойчивости в современных сложных многокольцевых энергосистемах постоянно возрастает в связи с повышенной нагрузкой межсистемных секций и внедрением новых агрегатов большой единичной мощности. Нарушение синхронной работы энергосистемы из-за потери устойчивости завершается возникновением асинхронного режима, приводящего к колебаниям режимных параметров вблизи электростанций и значительным скачкам токов. Это крайне негативно сказывается на ресурсе энергетического оборудования энергосистемы.

Электроэнергетические системы (ЭЭС), при нормальной эксплуатации, обеспечивают работу промышленности, транспорта, повседневную жизнь населения. Непрерывно растущая протяженность электроэнергетических систем, увеличение доли генераторов с ухудшенными параметрами в них, наметилась тенденция перевода их в режим потребления реактивной мощности с целью нормализации уровней напряжения в сети усложнили задачу обеспечения стабильности ЭПС. Все эти негативные факторы вызвали более частые нарушения стабильности ЭПС, подчеркивая актуальность и практическую значимость решения данной проблемы [1]. Эта проблема привела к совершенствованию методов исследования и углубленному изучению динамических свойств ЭПС. Для решения этой задачи большое значение имеет разработка высокоэффективных методов численного решения задач глобальной асимптотической устойчивости, оптимальности и обширные вычислительные исследования. Нарушения режима устойчивости ЭПС могут быть глобальными или локальными по своему характеру, затрагивая различные аспекты режима (синхронная параллельная работа генераторов и синхронных двигателей, стабильность асинхронных двигателей, стабильность частоты, стабильность напряжения).

Нарушение устойчивости связано с достижением критических состояний во взаимном движении объектов, которые выделяются в структурно неоднородной системе. Использование методов расчета режимов, методология которых включает формализованное выявление слабых элементов системы и факторов, влияющих на проявление различных слабых звеньев, является перспективным направлением в снижении размерности задачи изучения устойчивости энергосистем.

Исследования глобальной асимптотической устойчивости сложных энергетических систем связаны с расчетами массы в различных условиях.

Устойчивость и стабилизация движения электроэнергетических систем рассмотрены в [3-6]. Стабильность режима ЭПС является одной из основ надежности энергосистем и электроснабжения потребителей. Определена стабильная емкость ЭПС как важнейшая составляющая комплексного свойства надежности ЭПС

Но глобальная асимптотическая устойчивость сложных электроэнергетических систем с большим количеством генераторов до сих пор остается нерешенной проблемой [16,18,19,20]. Попытки решить проблему глобальной асимптотической устойчивости электроэнергетических систем «стандартными» рассуждениями с использованием «стандартных» функций Ляпунова обычно обречены на провал. В связи с этим долгое время существенно не было прогресса в направлении изучения фазовых систем по второму методу Ляпунова [12,15]. Современная теория устойчивости фазовых систем основана на работах Ю.Н. Бакаев, А.А. Гуж и Г.А. Леонов, С.А. Лебедев, С.А. Ульянов и другие посвящены проблеме устойчивости энергосистем. Их работы содержат фундаментальные основы теории устойчивости энергетических систем с точки зрения критериев и методов, математические модели элементов энергосистем [7,8,10,13].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрим динамическую систему с цилиндрическим фазовым пространством, описываемую дифференциальными уравнениями $(n+2)$ – порядка i -й изолированной подсистемы $Z_i^{n+2}(\delta, S, x)$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = w_i - K_i S_i - f_i(\delta_i)w_i = C_i^* x_i$$

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + q_i S_i + b_i u_i + R_i(S_i, x_i) \quad (2)$$

где — угловая координата; — угловая скорость; - - вектор состояния контроллера; $\delta_i S_i x_i n_i w_i$ являются управляющими действиями контроллера; $K_i > 0$ является коэффициентом демпфирования; $, ,$ являются постоянными $c_i q_i b_i n_i$ размерными векторами; постоянная матрица; A_i are $(n_i \times n_i) u_i$ являются элементами управления типа обратной связи. Символ $(*)$ указывает на операцию транспозиции. Вторыми являются дифференциальные уравнения порядка (1), описывающие процессы в управляемом объекте, а векторное дифференциальное уравнение (2) определяет состояние контроллера i -й изолированной подсистемы. Форма n - мерного вектора функции $f_i(\delta_i)$ задается позже.

Мы просканируем цилиндрическое фазовое пространство вдоль угловой координаты, а затем предположим, что системы (2) и (1) даны в евклидовом пространстве. $Z_i^{n+2}(\delta_i, S_i, x_i) \delta_i R_i^{n+2}(\delta_i, S_i, x_i)$

Пусть $f_i(\delta_i)$ - нелинейность в управляемом объекте, является непрерывно дифференцируемой периодической функцией, удовлетворяющей условиям $f_i(\delta_i)$

$$f_i(\delta_i) = f_i(\delta_i + 2\pi), \quad (\forall \delta_i \in R_i^1), \quad \gamma_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_i(\delta_i) d\delta_i \leq 0 \quad (3)$$

$$f_i(0) = 0, \quad \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i=0} > 0, \quad f_i(\delta_{0i}) = 0, \quad \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i=\delta_{0i}} < 0,$$

где и - нули функции на множестве. График функций схематично показан на рис.1. $\delta_i = 0$ $\delta_i = \delta_{0i}$ $f_i(\delta_i) [0, 2\pi]$ $f_i(\delta_i)$

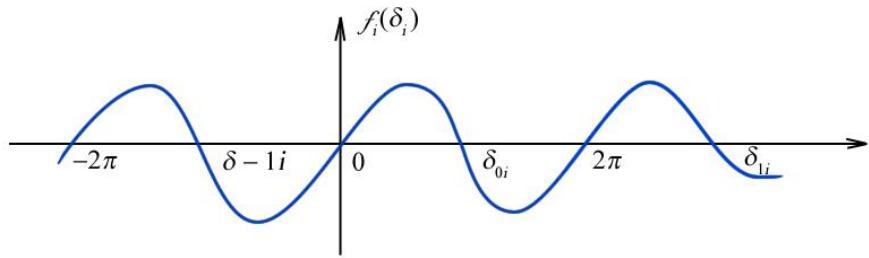


Рисунок 1.

Вводим

$$\Delta_i = \{\delta_i | f_i(\delta_i) = 0\} = \Delta_{1i} \cup \Delta_{2i},$$

$$\Delta_{1i} = \left\{ \delta_i | f_i(\delta_i) = 0, \quad \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} > 0 \right\} = \{2K_i\pi\},$$

$$\Delta_{2i} = \left\{ \delta_i | f_i(\delta_i) = 0, \quad \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} < 0 \right\} = \{\delta_{Ki}\},$$

Предположим, что система нелинейных алгебраических уравнений для имеет уникальное решение. Затем, при отсутствии управления, стационарное множество i -й изолированной подсистемы (1), (2) состоит из следующего бесконечного счетного множества точек в фазовом пространстве, $\delta_{Ki} = \delta_{0i} + 2K_i\pi$ ($\forall K_i \in Z_i$) $A_i x_i + R_i(s_i, x_i) = 0$ $x_i = 0_n$ $\det A_i \neq 0$ ($u_i = 0$) $\Lambda_i \subset R_i^{n+2}(\delta_i, s_i, x_i)$

$$\Lambda_i = \{(\delta_i, s_i, x_i) | \delta_i \in \Delta_i, s_i = 0, x_i = 0_n\} = \Lambda_{1i} \cup \Lambda_{2i},$$

$$\Lambda_{1i} = \{(\delta_i, s_i, x_i) | \delta_i \in \Delta_{1i}, s_i = 0, x_i = 0_n\},$$

$$\Lambda_{2i} = \{(\delta_i, s_i, x_i) \mid \delta_i \in \Delta_{2i}, s_i = 0, x_i = 0_{n_i}\}$$

Мы называем систему (1), (2) глобально асимптотически стабильной, если для любого начального условия существует точка, такая, что решение имеет свойство $\hat{z}_i = \{\hat{\delta}_i, \hat{s}_i, \hat{x}_i\}$ $z_{i*} = (\delta_{i*}, 0, 0_n) \in \Lambda_i$ $z_i(t) = z_i(t, \hat{z}_i) = \{\delta_i(t, \hat{z}_i), \delta_i(t, \hat{z}_i), x_i(t, z_i)\}$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|z_i(t) - z_{i*}\| = 0,$$

то есть любое решение стремится к некоторому равновесному состоянию из множества. Система (1), (2) будет называться моностабильным, если какое-либо ограниченное решение стремится к некоторому равновесному состоянию от $t \rightarrow +\infty$ $\Lambda_i \rightarrow +\infty \Lambda$

Рассмотрим теперь некоторые свойства подсистемы фазы второго порядка

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad \frac{dS_i}{dt} = -D_i S_i - f_i(\delta_i). \quad (4)$$

Стационарное множество системы (4), состоящее из бесконечного счетного множества точек фазовой плоскости, может быть представлено в виде комбинации двух несвязанных подмножеств и: $M_i R_i^2(\delta_i, s_i) M_{1i} M_{2i}$

$$M_i = \{(\delta_i, s_i) \mid f_i(\delta_i) = 0, s_i = 0\} = M_{1i} \cup M_{2i},$$

$$M_{1i} = \{(\delta_i, s_i) \mid \delta_i = 2k_i\pi, s_i = 0 \quad (\forall k_i \in Z_i)\},$$

$$M_{2i} = \{(\delta_i, s_i) \mid \delta_i = \delta_{Ki} = \delta_{0i} + 2k_i\pi, s_i = 0 \quad (\forall k_i \in Z_i)\}.$$

т легко проверить, что точки находятся в устойчивых равновесных положениях, а - неустойчивы. Фактически, развернув функцию в степенях и ограничив ее линейным членом разложения, мы получаем систему уравнений первого приближения в точке: $(2K_i\pi, 0) \in M_i$ $(\delta_{Ki}, 0) \in M_{2i}$ $(\forall k_i \in Z_i)$ $f_i(\delta_i)$ $(\delta_i - 2K_i\pi)$ $(2k_i\pi, 0)$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad \frac{dS_i}{dt} = -D_i S_i - \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i = 2K_i\pi}, \quad (\delta_i - 2K_i\pi).$$

Характеристическое уравнение записывается как

$$\lambda_i^2 + D_i \lambda_i + \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i = 2k_i\pi} = 0,$$

где для его корней у нас есть формулы

$$(\lambda_i)_{1,2} = \frac{1}{2} [-D_i \pm \sqrt{D_i^2 - 4 \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i}}] \Big|_{\delta_i = 2k_i\pi}$$

Если, то корни и являются отрицательными вещественными числами, а специальной точкой является $D_i^2 \geq 4 \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} |_{\delta_i = 2k_i\pi} (\lambda_i)_1 (\lambda_i)_2 (2k_i\pi, 0)$ «устойчивый узел».

Когда корни и будут комплексными числами с отрицательными вещественными частями. В этом случае состояние представляет собой особую точку типа «стабильный фокус».

$$D_i^2 < 4 \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} |_{\delta_i = 2k_i\pi}$$

$$(\lambda_i)_1 (\lambda_i)_2 (2k_i\pi, 0)$$

Для изучения природы устойчивости в точке составим систему первого приближения $(\delta_{k_i}, 0)$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad \frac{dS_i}{dt} = -D_i S_i - \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \Big|_{\delta=\delta_{k_i}} (\delta_i - \delta_{k_i}), \quad (5)$$

$$\lambda_i^2 + D_i \lambda_i + \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \Big|_{\delta=\delta_{k_i}} = 0,$$

где корни

$$(\lambda_i)_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{D_i^2 - 4 \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i}} \Big|_{\delta=\delta_{k_i}} \quad (6)$$

будут вещественными числами различных знаков, т.е. особая точка является «седлом» и соответствует неустойчивому равновесному положению $\delta_{k_i}, 0$

Две интегральные кривые и (сепараторы и система (4) проходят через седловую точку, которые являются касательными к точке интегральных линий системы первого приближения (5) с угловыми коэффициентами и (6) соответственно). $R_{K_i} S_{K_i} R_{K_i}^+ S_{K_i}^+ \delta_{k_i}, 0 \delta_{k_i}, 0 (\lambda_i)_1 (\lambda_i)_2$

Система (4) эквивалентна дифференциальному уравнению первого порядка

$$S_i \frac{dS_i}{dt} + D_i S_i + f_i(\delta_i) = 0, \quad (7)$$

где – критическое (бифуркационное) значение, вся фазовая плоскость делится интегральными кривыми на полосы – области притяжения соответствующих равновесных положений, т. е. подсистема (4) становится глобально асимптотически устойчивой. Более того, интегральные кривые подсистемы (4) соответствуют непрерывно дифференцируемым функциям, определенным вообще и удовлетворяющим следующим условиям: $D_i > (D_i)_{\text{cr}}(D_i)_{\text{cr}}R_i^2(\delta_i, S_i)S_{k_i}(\forall K_i \in Z_i)S_{k_i}(\forall K_i \in Z_i)S_{k_i}(\delta_i)\delta_i \in R_i^1$

$$S_{k_i} \frac{dS_{k_i}(\delta_i)}{d\delta_i} + D_i S_{k_i}(\delta) + f_i(\delta_i) = 0, \quad (\forall \delta_i \in R_i^1), \quad (8)$$

$$S_{k_i}(\delta_{k_i}) = 0, \quad (9)$$

$$\lim_{\delta_i \rightarrow -\infty} k_i(\delta_i) = +\infty, \quad \lim_{\delta_i \rightarrow +\infty} S_{k_i}(\delta_i) = -\infty, \quad (10)$$

$$S_{k_i-l_i}(\delta_i) = S_{k_i}(\delta_i + 2l_i\pi) \quad (\forall \delta_i \in R_i^1, \forall l_i \in Z_i) \quad (11)$$

Для подсистемы (4) не имеют предельных циклов первого рода, т.е. замкнутых траекторий в фазовой плоскости. Рассмотрим теперь общую модель многомерных фазовых систем: $D_i > 0R_i^2(\delta_i, S_i)$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i,$$

$$\frac{dS_i}{dt} = (W_i - K_i S_i - f_i(\delta_i)) - \psi_i(\delta_{i*}), \quad W_i = C_i^* x_i, \quad (12)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + q_i S_i + b_i u_i + R_i(S_i, x_i), i = \overline{1, l}, \quad (13)$$

где функция

$$\psi_i(\delta_{i*}) = \sum_{k=1, k \neq i}^l P_{ik}(\delta_{ik}), \quad \delta_{ik} = \delta_i - \delta_k, \quad (14)$$

определяет взаимосвязь между подсистемами и является заданной непрерывно дифференцируемой периодической функцией. $P_{ik}(\delta_{ik})$

Система вида (12)-(14) включает в себя электроэнергетические системы с несколькими генераторами, где функция определяет взаимодействие i -го генератора с другими генераторами в системе. $\psi_i(\delta_{i*})$

Системы (12), (13) могут быть переписаны в векторно-матричном виде:

$$\frac{d\delta}{dt} = S,$$

$$\frac{ds}{dt} = (W - KS - f(\delta)) - \psi(\delta), \quad W = C^*x, \quad (15)$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax + qS + bu + R(S, x), i = \overline{1, l}, \quad (16)$$

Здесь

$$\delta = \text{colon}(\delta_1, \dots, \delta_l), \quad S = \text{colon}(S_1, \dots, S_l), \quad x = \text{colon}(x_1, \dots, x_l),$$

$$u = \text{colon}(u_1, \dots, u_l), \quad f(\delta) = \text{colon}(f_1(\delta_1), \dots, f_l(\delta_l)),$$

$$\psi(\delta) = \text{colon}(\psi_1(\delta_1), \dots, \psi_l(\delta_l)), \quad W = \text{colon}(W_1, \dots, W_l),$$

$$R(S, x) = \text{colon}(R_1, \dots, R_l), \quad K = \text{diag}\{b_1, \dots, b_l\},$$

$$q = \text{colon}(q_1, \dots, q_l), \quad b = \text{diag}\{b_1, \dots, b_l\},$$

$$C = \text{diag}\{C_1, \dots, C_l\}, \quad A = \text{diag}\{A_1, \dots, A_l\},$$

Стационарное множество связанной системы (15)-(16) определяется как множество $\bar{\Lambda}$

$$\bar{\Lambda} = \{(\delta, S, x) | f(\delta) + \psi(\delta) = 0, x = 0_{n_l}, S = 0_l\}. \quad (17)$$

Здесь точка (17) также является стационарной точкой, а ближайшие к ней стационарные точки слева и справа определяются как $0_l, 0_l, 0_{n_l} Z_0$

$$Z_{-1} = (\bar{\delta}_{-1}, 0_l, 0_{n_l}), \quad Z_1 = (\bar{\delta}_1, 0_l, 0_{n_l}), \quad (18)$$

$$(\bar{\delta}_{-1})_i = \max_{\delta_i \in \bar{\Delta}_i \cap (-\infty, 0)} \delta_i, \quad (\delta_i)_i = \min_{\delta_i \in \bar{\Delta}_i \cap (0, +\infty)} \delta_i,$$

$$\bar{\Delta} = \{\delta | f(\delta) + \psi(\delta) = 0\}, \quad \bar{\Delta} = \text{colon}(\bar{\Delta}_1, \dots, \bar{\Delta}_l).$$

Теорема 1. Линейная однородная система с постоянными коэффициентами асимптотически стабильна тогда и только тогда, когда все собственные значения λ_i имеют отрицательные вещественные части: $\operatorname{Re}[\lambda_i] < 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

Рассмотрим нелинейную автономную систему $X f (X)$. Предположим, что система имеет нулевое решение X_0 , которое мы будем изучать на устойчивость.

Постановка задачи изучения глобальной асимптотической устойчивости нелинейных систем управления в электроэнергетических системах

Традиционным подходом к изучению устойчивости сложных электроэнергетических систем является математическое моделирование режимов работы сложной энергосистемы.

Нарушение устойчивости связано с достижением критических состояний во взаимном движении объектов, которые выделяются в структурно неоднородной системе. Использование методов расчета режимов, методология которых включает формализованное выявление слабых элементов системы и факторов, влияющих на проявление различных слабых звеньев, является перспективным направлением в снижении размерности проблемы изучения устойчивости энергосистем.

Рассмотрим глобальную асимптотическую стабильность связанной системы со многими угловыми координатами в случае, если

$$R_i(S_i, x_i) = e_i \phi_i(\sigma_i), \sigma_i = g_i^* x_i + \gamma_i S_i, i = \overline{1, l}, \quad (19)$$

где g_i, e_i, n_i, γ_i - константы, векторы, скалярная константа. В этом случае система (1)-(3) принимает вид:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad \frac{dS_i}{dt} = w_i - K_i S_i - f_i(\delta_i) - \psi_i(\delta_{i^*}), w_i = C_i^* x_i, \quad (20)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + q_i S_i + b_i u_i + e_i \phi_i(\sigma_i), i = \overline{1, l} \quad (21)$$

или в виде векторной матрицы

$$\frac{d\delta}{dt} = S, \quad \frac{dS}{dt} = w - KS - f(\delta) - \psi(\delta_*), w = C^* x, \quad (22)$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax + qS + bu + e\phi(\sigma), \sigma = g^* x + \gamma S, \quad (23)$$

где $e = \text{colon}(e_1, \dots, e_l), \gamma = \text{colon}(\gamma_1, \dots, \gamma_l), g = \text{diag}\{g_1, \dots, g_l\}$.

Характеристики нелинейных элементов - непрерывные функции, удовлетворяющие условиям $\phi_{i_i}(\sigma_i)$

$$0 \leq \phi_{i_i}(\sigma_i) \sigma_i \leq \rho_i \sigma_i^2, \phi_i(0) = 0, i = \overline{1, l}$$

$$(\forall \sigma_i \in (0, +\infty), \forall \sigma_i \in R_i^1).$$

Если для функции существуют неравенства следующей формы:

$$\rho_{1i}\sigma_i^2 \leq \phi_{i_i}(\sigma_i)\sigma_i \leq \rho_{2i}\sigma_i^2, (\rho_{1i}\sigma_i^2, \rho_{2i}\sigma_i^2 \in (-\infty, +\infty), \forall \sigma_i \in R_i^1),$$

затем после замены мы придем к рассматриваемым делу; в то же время. Дифференциальное уравнение (21) переписано как $\bar{\phi}_i = \phi_i - \rho_{1i}\sigma_i$ $\rho_i = \rho_{2i} - \rho_{1i}$

$$\frac{dx_i}{dt} = \bar{A}_i x_i + \bar{q}_i S_i + b_i u_i + e_i \bar{\phi}_i(\sigma_i), i = \overline{1, l},$$

где и нелинейность удовлетворяет условию $\bar{A}_i = A_i + \rho_{i_i} e_i g_i^*, \bar{q}_i = q_i + \rho_{1i} \gamma_i \bar{\phi}_i(\sigma_i)$

$$0 \leq \phi_i(\sigma_i)\sigma_i \leq (\rho_{2i} - \rho_{1i})\sigma_i^2, (\rho_{2i} - \rho_{1i} = \rho_i \in (0, +\infty), \forall \sigma_i \in R_i^1).$$

Ограничение (9) эквивалентно неравенству

$$\phi_i(\sigma_i)(\sigma_i - \rho_i^{-1}\phi_i(\sigma_i)) \geq 0, (\rho_i \in (0, +\infty), \forall \sigma_i \in R_i^1), i = \overline{1, l}.$$

Функция

$$\psi_i(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} \phi_i(\lambda) d\lambda, \quad i = \overline{1, l}$$

— положительная полуопределенная функция.

Теорема 2. Пусть будут скаляры такие, что $D_i, \tau_i > 0$

Система фаз второго порядка

$$\frac{d\delta_i}{dt} = S_i, \quad \frac{dS_i}{dt} = -D_i S_i - f_i(\delta_i).$$

глобально асимптотически стабилен (т.е.) $D_i > (D_i)_{cr}$

\tilde{A}_i — матрица Гурвица.

() — полностью наблюдаемая пара \tilde{A}_i, G_i

() — полностью управляемая пара \tilde{A}_i, Q_i

$$\bar{\Gamma}_i > 0, \det \left[2\bar{\Gamma}_i - \chi_i^* h_i^* \tilde{D}_i^{-1} h_i \chi_i \right] \neq 0 \quad (i = \overline{1, l}).$$

$$\Gamma_i + \operatorname{Re} W_i(j\omega) \geq 0 \quad (\forall \omega \in (-\infty, +\infty)), L_i \geq 0, \tilde{D}_i > 0.$$

Затем контроль

$$u_i = a_i^* x_i + \theta_i S_i + \bar{\varepsilon}_i \phi_i(\delta_i) + \frac{s_i \psi_i(\delta_i^*)}{x_i^* H_i b_i} \quad y \quad z_i \in \Sigma_i$$

$$u_i \neq -(b_i^* H_i b_i)^{-1} (b_i^* H_i A_i x_i + b_i^* H_i q_i S_i + b_i^* H_i e_i \phi_i(\sigma_i)) \text{ } y z_i \notin \Sigma_i, i = \overline{1, l}$$

обеспечивает глобальную асимптотическую стабильность системы (22), (23).

Теорема 3. Пусть будут скаляры такие, что $D_i, \tau_i > 0, \tau_{1i} > 0$

1) Фазовая система второго порядка (4) глобально асимптотически стабильна (т.е.), $D_i > (D_i)_{cr}$

2) — матрица Гурвица \tilde{A}_i

3) (u — полностью наблюдаемая пара, $\tilde{A}_i, \bar{\bar{g}}_i^*$) (\tilde{A}_i, \bar{g}_i)

4) ()— полностью контролируемая пара, \tilde{A}_i, Q_i

$$\bar{\Gamma}_i + ReW_i(j\omega) - \tau_{1i}\bar{K}_i^2[\chi_i(j\omega)]^2 \geq 0 \quad (\forall \omega \in (-\infty, +\infty))$$

5) $L_i \geq 0, \tilde{D}_i > 0, \bar{\bar{\Gamma}}_i > 0, \det[2\bar{\bar{\Gamma}}_i - \chi_i^* h_i^* \tilde{D}_i^{-1} h_i \chi_i] \neq 0, i = \overline{1, l}$

Затем контроль

$$u_i = a_i^* x_i + \theta_i S_i + \bar{\varepsilon}_i \phi_i(\sigma_i) + \varepsilon_{2i} v_i(\eta_i) + \frac{s_i \psi_i(\delta_i)}{x_i^* H_i b_i} \text{ } y \quad z_i \in \Sigma_i$$

$$u_i \neq -(b_i^* H_i b_i)^{-1} (b_i^* H_i A_i x_i + b_i^* H_i q_i S_i + b_i^* H_i e_i \phi_i(\sigma_i) + b_i^* H_i \bar{e}_i v_i(\eta_i))$$

$$y z_i \notin \Sigma_i, i = \overline{1, l}$$

обеспечивает глобальную асимптотическую стабильность системы (22), (23)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим пример электроэнергетики при (два синхронных генератора).

$$\ell = 2$$

Начальные условия:

$$\delta_{10} = 1.34; \delta_{20} = 0.84;$$

$$S_{10} = 0.0; S_{20} = 0.0;$$

$$x_{10} = 0.001; x_{20} = 0.001;$$

Все условия теоремы 2 проверены.

$$\frac{d\delta}{dt} = S, \quad \frac{ds}{dt} = w - KS - f(\delta) - \psi(\delta_*), \quad w = C^* x,$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax + qS + bu + e\phi(\sigma), \quad \sigma = g^* x + \gamma S,$$

Для получения численных решений мы используем методы Эйлера и Рунге-Кутта 4-го порядка.

Результаты численного решения показаны на рисунках (3) - (6).

Для более точных результатов мы используем 4-й порядок методов Адамса-Башфорда (A-B), Адамса-Моултона (A-M) и Рунге-Кутте (R-K).

Метод Адамса-Башфорда:

$$y_{n+4} = y_{n+3} + \frac{h}{24} (55f(t_{n+3}, y_{n+3}) - 59f(t_{n+2}, y_{n+2}) + 37f(t_{n+1}, y_{n+1}) - 9f(t_n, y_n)), \quad \frac{251}{720} h^5(\eta).$$

Метод Адамса-Моултона:

$$y_{n+4} = y_{n+3} + \frac{h}{24} (9f(t_{n+4}, y_{n+4}) + 19f(t_{n+3}, y_{n+3}) - 5f(t_{n+2}, y_{n+2}) + f(t_{n+1}, y_{n+1})), \quad -\frac{19}{720} h^5(\eta).$$

Метод Рунге-Кутте:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

Сравнение используемых методов показано ниже:

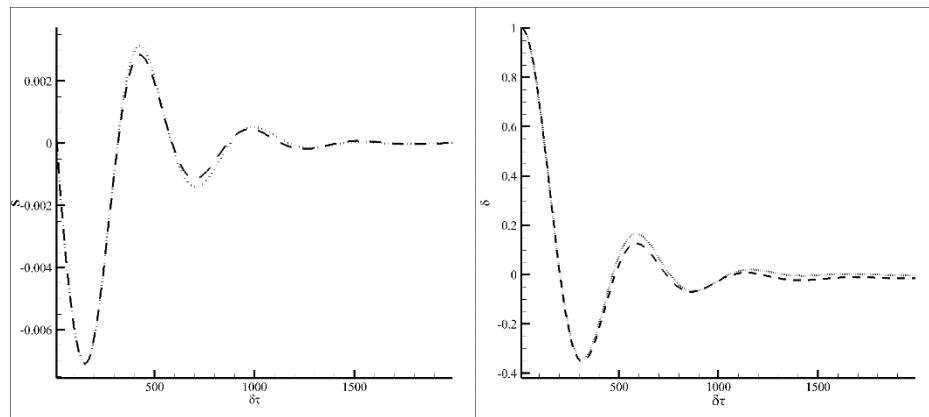


Рисунок 3.- Метод А-В (линия - - -), А-М ((линейный) метод 4-го порядка ...

а) S изменение во времени; б) изменение во времени δ

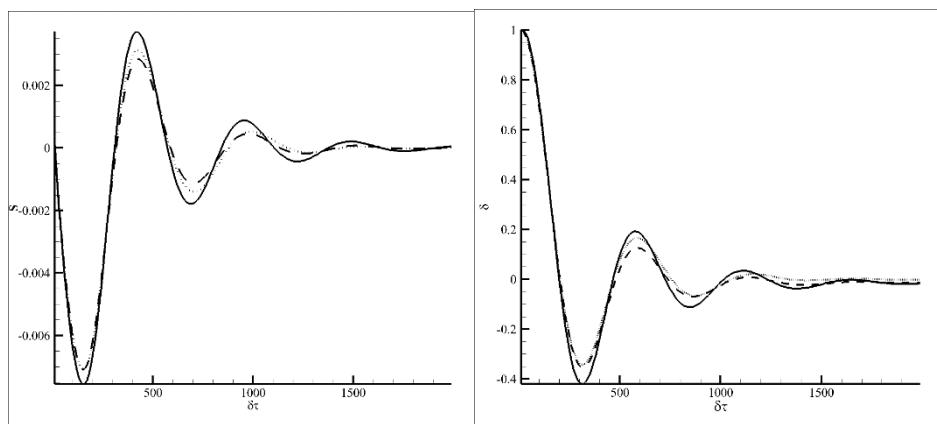


Рисунок 4. - Метод А-В (линия --), А-М (линия) и Метод Эйлера (линия -) 4-го порядка ...
а) изменение во времени S ; б) изменение во времени δ

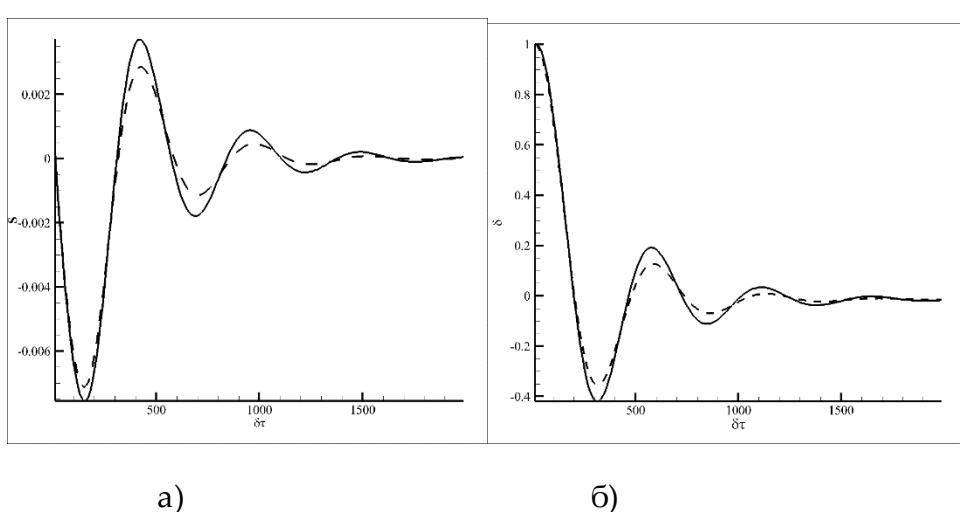


Рисунок 5. – Методы R-K (линия --) и Эйлера (линия -) 4-го порядка
а) изменение во времени δ ; б) изменение во времени S

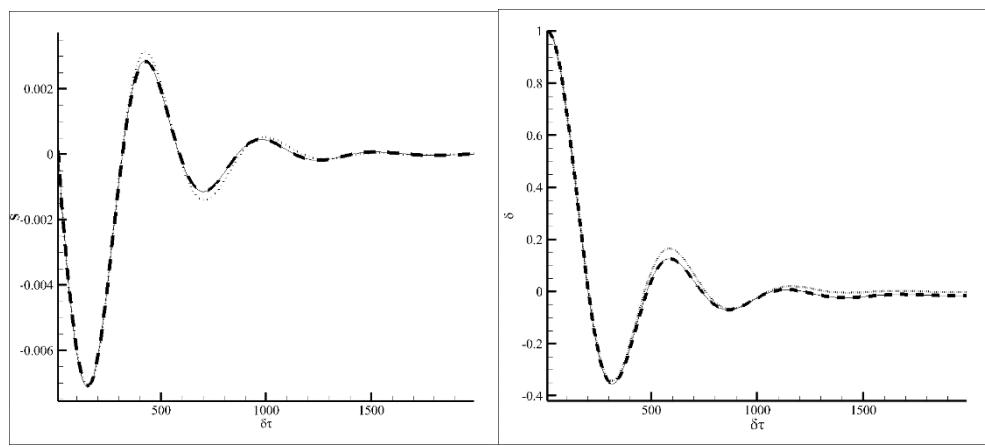


Рисунок 6. –метод А-В (линия - -), метод А-М (линия) и Р-К (линия -) 4-го порядка ...

а) изменение во времени δ ; б) изменение во времени S

Из полученных результатов видно, что не стоит увеличивать на порядок больше 4, так как они одинаково сходятся к нулю. Исследование показало, что использование методов Адамса-Башфорда и Рунге-Кутте более эффективно, так как они сходятся к нулю быстрее, чем при использовании метода Адамса-Моултона. Это позволит сэкономить время и ускорить процесс выявления чрезвычайных ситуаций.

Проведен детальный анализ проблемы с определением и обнаружением входной и выходной информации. Проводились два вида испытаний: функциональные и структурные. Во время функционального тестирования программы ведет себя в соответствии со своей внешней спецификацией. В ходе структурного тестирования программы была проверена логика программы. Программные продукты изначально создавались для решения специфических задач сложных электроэнергетических систем. Затем они были объединены в единый набор программ. При создании программного продукта использовались методы Адамса-Башфорда, Рунге-Кутте 4-го порядка и методы Адамса-Моултона. На рисунке (7) показан интерфейс программного пакета. Представлены различные подходы к построению угловых характеристик глобальной асимптотической устойчивости синхронных генераторов.

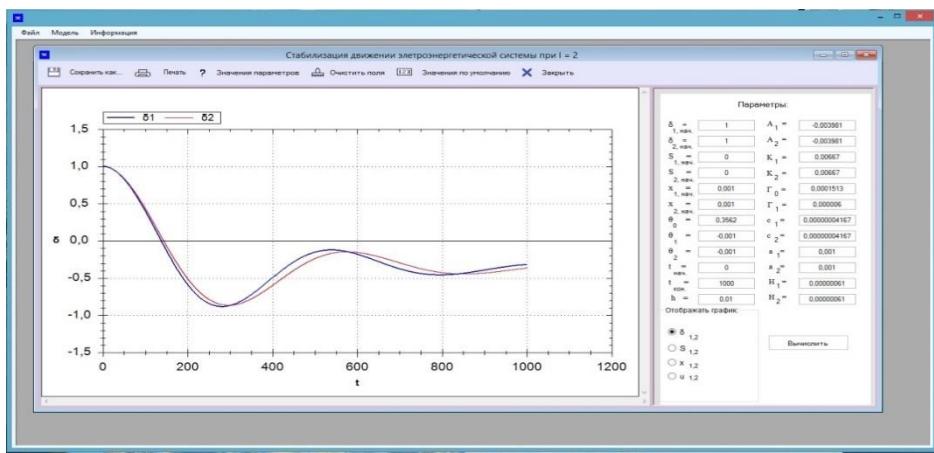


Рисунок 7. Введение числовых данных для выбранного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена математическая модель сложных электроэнергетических систем для задач глобальной асимптотической устойчивости, описываемых дифференциальными уравнениями, правые части которых являются периодическими по угловым координатам. Разработан программный комплекс, реализующий различные подходы к построению стабильности синхронного генератора. Компьютерное моделирование позволяет проанализировать степень влияния параметров системы на стабильность синхронного генератора.

В этой статье представлена новая идея как для глобального контроля асимптотической устойчивости, так и для регулирования напряжения. В исследовании получены условия глобальной асимптотической устойчивости нелинейных систем управления. Рассмотрен численный пример, результаты которого показывают, что нет необходимости увеличивать более чем на 4 шага, так как они одинаково сходятся к нулю. Результаты численного примера были получены в виде графиков. Расчеты производились на примере готовых данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование и оценка электроэнергетики Казахстана // Журнал энергетики Казахстана.– 2015. –Т.3. – С.18-23.
2. Темиргалиев Н. и Джунусова М., 2020. Производство возобновляемой электроэнергии и устойчивость национальных и региональных энергосистем Казахстана. Silk Road: A Journal of Eurasian Development, 2(1), pp.35–53.
3. Бияров Ю.Н., Калимолдаев М.Н. Глобальная асимптотическая устойчивость многомерных фазовых систем с нелинейным контроллером // В кол.: Обратные задачи динамики и их приложения. – Алма-Ата: Публ.дом КазГУ,1986. – С. 12-17.

4. Калимолдаев М.Н. Устойчивость и математическое моделирование нелинейных многомерных фазовых систем: дисс. ... док. физ.-мат. с. - 13.05.16. – Бишкек, 2000, С.293.
5. Максат Н. Калимолдаев, Мувашархан Т. Дженалиев, Асель А. Абдильдаеваи Лейла С. Копбосын Об оптимальности одной энергосистемы // Труды конференции АИП 1611, 194 (2014); doi: 10.1063/1.4893830 // <http://dx.doi.org/10.1063/1.4893830>: 17.08.2014.
6. М. Калимолдаев, М. Дженалиев, А. Абдильдаева, Лейла Копбосын. Проблемы оптимального управления нелинейными системами //ICINCO - 12-я Международная конференция по информатике в управлении, автоматизации и робототехнике. – Кольмар, Эльзас, Франция, 2015. – С. 184-189.
7. Бакаев Ю.Н., Гуж А.А. Оптимальный прием сигналов частотной модуляции в условиях эффекта Доплера, Радиотехника и электроника, 1965, В.10, №1, с.175-196.
8. Гелиг А.Кх., Леонов Г.А., Якубович В.А. Устойчивость нелинейных систем с неуникального равновесного состояния. – М.: Наука, 1978. – С.400.
9. Максат К., Асель А., Тамара З., Тураев С. Исследование интернета вещей (IoT) в электроэнергетических системах (2019) Новости Национальной академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук, 5 (437), с. 144-150.
10. Chiang, H., & Alberto, L. (2015). Области устойчивости нелинейных динамических систем: теория, оценка и приложения (стр. 452-466). Кембридж: Издательство Кембриджского университета
11. Калимолдаев М., Дрозденко А., Коплык И., Маринич Т., Абдильдаева А., Жукабаева Т. Анализ современных подходов к прогнозированию потребления электрической энергии (2020) Open Engineering, 10 (1), с. 350-361.
12. H. Liu, Z. Hu and Y. Song, "Lyapunov-Based Decentralized Excitation Control for Global Asymptotic Stability and Voltage Regulation of Multi-Machine Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 2262-2270
13. Casagrande, D., Astolfi, A., Langarica, D., Ortega, R. Решение проблемы стабильности переходных процессов с несколькими машинами и смоделированная валидация в реалистичных сценариях (2014) IET Generation, Transmission and Distribution, 8 (8), pp. 1392-1405
14. Максат К., Асель А., Тамара З., Тураев С. Исследование интернета вещей (IoT) в электроэнергетических системах (2019) Новости Национальной академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук, 5 (437), с. 144-150
15. K. Emami, T. Fernando, H.H.C. Iu, H. Trinh, K.P. Wong, "Particle Filter Approach to Dynamic State Estimation of Generators in Power Systems," IEEE Trans. on Power Syst., vol. 30, no. 5, pp. 2665–2675, 2015

16. M. Anghel, F. Milano and A. Papachristodoulou, "Algorithmic Construction of Lyapunov Functions for Power System Stability Analysis", in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 60, no. 9, pp. 2533-2546, Sept. 2013, doi:10.1109/TCSI.2013.2246233
17. H. Liu, J. Su, J. Qi, N. Wang and C. Li, "Decentralized Voltage and Power Control of Multi-Machine Power Systems With Global Asymptotic Stability", in IEEE Access, vol. 7, pp. 14273-14282, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893409.
18. Arghir, C., Jouini, T., Dörfler, F. Управление формированием сети для преобразователей мощности на основе согласования синхронных машин (2018) Automatica, 95, стр. 273-282
19. Марценюк, В.; Карпинский, М.; Раджба, С.; Никодем, Ж.; Варвас, К.; Веклав, Л.; Gancarczyk, Т. Глобальная асимптотическая стабильность и нелинейный анализ модели квадратного массива иммунопикселей на основе дифференциальных уравнений задержки решетки. Симметрия 2020, 12, 40
20. Rtibi, H., Elloumi, S., Benhadj Braiek, N. Разработка децентрализованного нелинейного контроллера для класса неопределенных полиномиальных взаимосвязанных систем: Применение для крупномасштабной энергосистемы (2019) Труды Института измерения и управления, 41 (8), стр. 2236-2249.
21. Y. Guo, D.J. Hill, Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 678–688, 2001.

ФАЗАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ АСИМПТОТИКАЛЫҚ ТҮРАҚТЫЛЫҒЫНЫҢ ҒАЛАМДЫҚ ӘДІСІ

Аннотация: Мақалада оң жақтары бұрыштық координатта мерзімді болатын дифференциалдық тендеулермен сипатталған жаһандық асимптотикалық түрақтылық есептері үшін күрделі электр энергетикалық жүйелердің математикалық моделін зерттеу және дамыту қарастырылған. Сызықтық емес басқару жүйелерінің жаһандық асимптотикалық түрақтылығының шарттары алынды. Алынған нәтижелердің қолданылуын суреттейтін және энергетикалық жүйелердің ғаламдық асимптотикалық түрақтылығын зерттеу процедураларын көрсететін мысал көлтірілген. Дифференциалдық тендеулермен сипатталған жаһандық асимптотикалық түрақтылық есептеріне арналған күрделі электр энергетикалық жүйелердің математикалық моделі зерттелді, олардың оң бөліктері бұрыштық координатта мерзімді болады. Синхронды генератордың түрақтылығын құрудың әртүрлі тәсілдерін жүзеге асыратын бағдарламалық кешен жасалды. Компьютерлік модельдеу жүйе параметрлерінің синхронды генератордың түрақтылығына әсер ету дәрежесін талдауға мүмкіндік береді. Бұл мақалада асимптотикалық түрақтылықты жаһандық бақылау үшін де, кернеуді реттеу үшін де жаңа идея ұсынылған. Зерттеу сызықтық емес басқару жүйелерінің ғаламдық асимптотикалық түрақтылығының шарттарын алды. Сандық мысал қарастырылады, оның нәтижелері 4 қадамнан артық көбейтудің қажеті жоқ екенін көрсетеді, өйткені олар нөлге тең болады. Сандық мысалдың нәтижелері графиктер түрінде алынды. Есептеулер дайын мәліметтер мысалында жүргізілді.

Түйінді сөздер: Электр энергетикасы жүйесі; жаһандық асимптотикалық тұрақтылық; математикалық модель

Автор жайлы ақпарат: М. Н. Қалимoldаев, А. А. Әбділдаева, ҚР БФМ ФК ақпараттық және есептеу технологиялары институты; mnk@ipic.kz

GLOBAL METHOD OF ASYMPTOTIC STABILITY OF PHASE SYSTEMS

Abstract: The article deals with the study and development of a mathematical model of complex electric power systems for problems of global asymptotic stability described by differential equations, the right sides of which are periodic in angular coordinate. The conditions of global asymptotic stability of nonlinear control systems are obtained. An example is given illustrating the application of the obtained results and demonstrating the procedures for studying the global asymptotic stability of energy systems. A mathematical model of complex electric power systems for problems of global asymptotic stability described by differential equations, the right parts of which are periodic in angular coordinate, is investigated. A software package has been developed that implements various approaches to building the stability of a synchronous generator. Computer modeling allows analyzing the degree of influence of system parameters on the stability of a synchronous generator. This article presents a new idea for both global control of asymptotic stability and voltage regulation. The conditions of global asymptotic stability of nonlinear control systems are obtained in the study. A numerical example is considered, the results of which show that there is no need to increase by more than 4 steps, since they converge equally to zero. The results of the numerical example were obtained in the form of graphs. Calculations were made using the example of ready-made data.

Keywords: electric power system; global asymptotic stability; mathematical model

Information about the author: M.N. Kalimoldaev, A.A. Abdildayeva, Institute of Information and Computing Technologies of the KN MES RK; mnk@ipic.kz