УДК 681.5.01.77

НАПРАВЛЕННАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Бакасова Айна Бакасовна, *д.т.н., доцент, Институт автоматики и информационных технологий национальной академии наук КР, Кыргызстан, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265, e-mail: bakasovaaina@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-5514-893X*
Кыдырмаева Зарылбү Самтыровна, *соискатель, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 721000, г. Кара-Куль, ул. Сабирова 2, e-mail: zoya74_74@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1233-8530*

Аннотация. В настоящее время опыт организации управления электроэнергетических систем (ЭЭС) как динамическая система (ДС) управления, функционирующие в различных режимах, показывает, что нет гарантии энергетической безопасности из-за возникновения хаотических режимов. Для этого необходима разработка целостной системы предупреждения и устранения негативных явлений подобного рода. Проблема не только актуальна сейчас, но и становится все более актуальной со временем в условиях рынка энергоресурсов и усложнения топологии сетей генерации и передачи электроэнергии и увеличением нагрузки на элементы ЭЭС. Сложность исследования хаотических режимов в ЭЭС обусловлена, прежде всего, отсутствием надежных инженерных методов их идентификации, которая затрудняется ограниченной длительностью наблюдения процессов в реальных системах, возникновением хаотичности зачастую только в узком диапазоне параметров систем. Новые возможности исследования моделей существенно нелинейных ДС позволяют выявлять тенденции их процессов к порядку, либо хаосу, вскрывать механизмы перехода от порядка к хаосу, изучать собственно хаос и тем самым более углубленно анализировать проблему устойчивости. Предлагается вычислительный алгоритм решения задач управления сложными нелинейными энергообъектами с хаотической динамикой методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления (СТУ) на примере электротехнической модели Чуа.

Ключевые слова: хаотическая динамика, синергетическая теория управления, направленная самоорганизация, аттрактор, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, перемежающаяся дуга, модель Чуа

DIRECTED SELF-ORGANIZATION OF COMPLEX ENERGY OBJECTS WITH CHAOTIC DYNAMICS

***Bakasova Aina Bakasovna**, doctor of technical sciences, associate professor, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan, 720071, Bishkek, Chui Ave. 265, e-mail: bakasovaaina@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-5514-893X*

***Kydyrmaeva Zarylbu Samtyrovna**, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Kyrgyzstan, 721000, Kara-Kul, Sabirova st. 2, e-mail: zoya74_74@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1233-8530*

Abstract. At present, experience in organizing the management of electric power systems (EPS) as a dynamic system (DS) of control operating in different modes shows that there is no guarantee of energy security due to the emergence of chaotic regimes. For this, it is necessary to develop an integrated system for preventing and eliminating negative phenomena of this kind. The problem is not only relevant now, but it is becoming more relevant with time in the conditions of the energy market and the complication of the topology of generation and transmission networks and increasing the load on EPS elements. The complexity of studying chaotic regimes in EPS is due, first of all, to the lack of reliable engineering methods for their identification, which is hampered by the limited duration of monitoring processes in real systems, the emergence of chaos often only in a narrow range of system parameters. New possibilities for investigating models of essentially nonlinear DS allow us to identify the tendencies of their processes to order or chaos, to reveal the mechanisms of the transition from order to chaos, to study chaos itself and thereby to analyze the problem of stability in more depth. A computational algorithm for solving control problems for complex nonlinear energy objects with chaotic dynamics is proposed by the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR) of the synergetic control theory (STU) using the example of Chua electrotechnical model.

Keywords: chaotic dynamics, synergetic control theory, directed self-organization, attractor, analytical construction of aggregated regulators, intermittent arc, Chua model

Диссипативные структуры играют важнейшую роль во многих сложных системах, в которых возникают бифуркационные и хаотические явления. Хаотические режимы таких систем могут быть как нежелательными, так и требуемыми технологическими процессами. Примерами желательности хаотического поведения являются процессы в генераторах хаотических автоколебаний, технологии псевдосжижения, широко применяемые при сжигании топлива на электростанциях, сушке различных материалов, в химических процессах и т.д. [8]. Нежелательное хаотическое поведение объектов, часто возникает в критических и экстремальных режимах их движения, например, в ЭЭС – различные внешние и внутренние возмущения, которые способствуют появлению системных колебаний приводящие к нарушению устойчивости системы, асинхронному ходу и развитию системной аварии. На этой основе возникает принципиально новая проблема управления хаосом [2, 8].

Сложность исследования хаотических режимов в ЭЭС обусловлена, прежде всего, отсутствием надежных инженерных методов их идентификации, которая затрудняется ограниченной длительностью наблюдения процессов в реальных системах, возникновением хаотичности зачастую только в узком диапазоне параметров систем, маскировкой этих режимов другими более известными процессами и явлениями [5].

Расширение практического применения нелинейных устройств во всех объектах электротехники и современной электроэнергетики определяет высокую вероятность возникновения в их системах (в особенности автономных и слабосвязанных) хаотического поведения процессов [1].

Их локализация в ограниченных областях режимных параметров, самоорганизация и самоподдерживание (т.е. устойчивость в некотором новом «хаотическом» смысле) не противоречат представлениям об условиях работоспособности систем, позволяют говорить о хаотических режимах и поставить вопрос о пересмотре традиционных для электроэнергетики представлений об устойчивости [5].

Потребность повышения надежности, дальнейшего углубления физических представлений о природе хаотических явлений в ДС, получения новой информации о проявлениях исследуемых возмущений, а также необходимость разработки эффективных методик для контроля параметров отражения динамических характеристик обуславливают построение методов управления и воздействия на хаотические процессы.

Новые возможности исследования моделей существенно нелинейных ДС позволяют выявлять тенденции их процессов к порядку, либо хаосу, вскрывать механизмы перехода от порядка к хаосу, изучать собственно хаос и тем самым более углубленно анализировать проблему устойчивости. Последнее особенно важно для моделей энергообъектов (ЭО) ЭЭС, поскольку может расширить представления о границах работоспособности этих объектов, традиционно связанной с устойчивостью их процессов.

В работе [5] приведены некоторые простые математические модели для широкого круга объектов современной электроэнергетики, которые описывают хаотические режимы:

- МГД-генераторы и лазерные установки;
- Системы с синхронными генераторами (СГ);
- Цепи с параметронами (устройства – трансформирующие и стабилизирующие напряжения, обеспечивающие гальваническую развязку цепей, защиты от перенапряжений и КЗ, конвертирование однофазного напряжения в трехфазное, фильтрации сигналов и т.д.);
- устройства с ферромагнитными системами;
- системы автоматики;
- регулируемый электропривод постоянного тока;
- цифровые и импульсные системы автоматики;
- токопроводы;
- вентильные цепи.

Качественное представление о хаотических процессах в перечисленных объектах ЭЭС дают базовые модели Лоренца, Дуффинга, Пуанкаре, Ван-дер-Поля, Пиковского-Рабиновича [3]. Здесь хаотические процессы рассмотрены применительно только к объектам ЭЭС с детерминированными параметрами. В реальной ситуации влияние на объекты ЭЭС сопредельных устройств и внешней среды носит во многом стохастический характер, что в еще большей мере способствует возникновению подобных процессов.

Рассмотренные в работе [5] основные примеры возникновения хаотических режимов в элементах ЭЭС, их математические модели, в частности, описывающих электромагнитные процессы в ЭО, позволяют сформулировать методы анализа хаотических режимов нелинейных систем, а также выполнить анализ методов управления режимами с целью стабилизации и ликвидации негативных последствий и определить комплекс условий возникновения хаотических режимов в ЭЭС, создающих предпосылки к возникновению системных аварий [6].

Можно отметить, что проблема управления хаосом не решена окончательно и нуждается в развитии новых направлений в науке управления. Для реализации в управляемых сложных ДС идеи «порядок из хаоса» целесообразно использовать метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления (СТУ) для синтеза упорядочивающих объективных законов управления соответствующими технологическими процессами, в которых возникновение хаотических режимов на определенном интервале времени приводит к значительному улучшению их показателей качества.

СТУ обеспечивает направленную самоорганизацию в многомерных динамических системах со многими степенями свободы [7-9, 12]. При осуществлении самоорганизации системы происходит изменение управляемых параметров непредсказуемым образом. В трудах [7-9] рассмотрены применения метода АКАР СТУ для решения задач управления нелинейными объектами с хаотической динамикой, описываемыми моделью Лоренца и Рёсслера.

Направленная самоорганизация электротехнической модели Чуа. В электроустановках 6-35 кВ большинство замыканий на землю происходит через перемежающуюся дугу, которая более опасна, чем устойчивое замыкание, так как при продолжительном ее существовании, вызывает повреждение оборудования и инициирует перенапряжения в сети.

Перемежающаяся дуга в распределительных сетях 6-35 кВ ЭЭС, появляющаяся в результате однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), имеет хаотическое поведение возникновения [10]. В работе [9] предложен новый подход в построении модели перемежающейся дуги объясняющий процессы, наблюдаемые в сети (рис.1), как колебательные процессы в связанных осцилляторах. Предполагая, что в фазе С произошло ОЗЗ, и в результате которой образовался ряд связанных колебательных контуров K_1, K_2, и K_3 (рис. 1), проанализировано динамика хаотического процесса в рассматриваемой сети [10,11]. Устойчивость нелинейных колебаний связанных контуров, и поведение электрической дуги можно проанализировать путем совместного рассмотрения переменных состояния связанных контуров K_1, K_2, и K_3, так как вследствие электрической связи они могут обмениваться энергией. И предполагается, что устойчивость горения электрической дуги зависит от баланса энергий, которыми обмениваются эти контура.

Для исследования эволюции рассматриваемой системы (рис. 1), построена нелинейная математическая модель дугового замыкания в схемах замещения электрической сети (рис. 2), описывающая колебательные процессы, с учетом нелинейности и стохастичности параметров электрической дуги $R_Д$ и $X_Д$ [11].

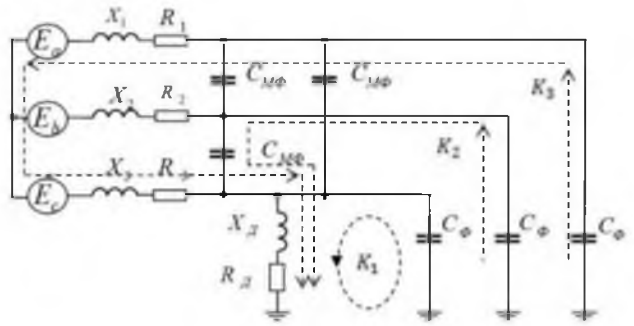


Рис.1. Схема для анализа дуговых перенапряжений

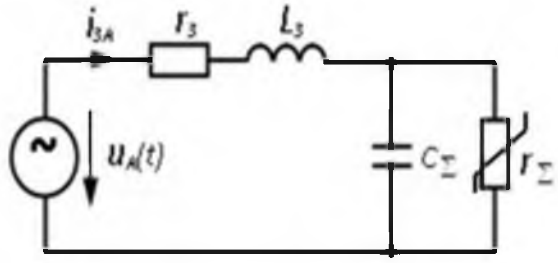


Рис.2. Схема замещения трехфазной цепи с дуговым замыканием

Была обнаружена идентичность схемы замещения трехфазной цепи с дуговым замыканием (рис. 2) с электротехнической моделью Чуа (рис. 3).

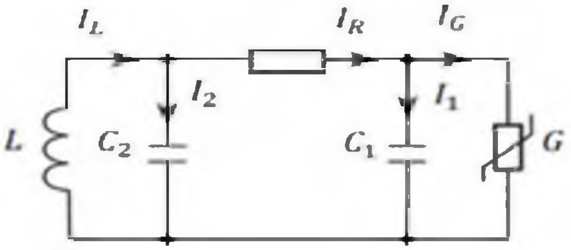


Рис.3. Электротехническая модель Чуа

Электротехническая модель Чуа описывает устойчивые и хаотические процессы в различных физических системах, в зависимости от значений управляющего параметра α. Модель Чуа является одной из примеров физической системы, хаотическое поведение которой подтверждено тремя различными подходами: лабораторными экспериментами, моделированием на ЭВМ и математическим анализом [3, 4].

$$\begin{aligned}&\dot{x}=\alpha[y-h(x)];\\&\dot{y}=x-y+z;\\&\dot{z}=-\beta y,\end{aligned} \qquad (1)$$

Функция $h(x)$ задается в виде [10]:

$$h(x)=bx+0,5(a-b)(|x+1|-|x-1|), \qquad (2)$$

где $\alpha=\dfrac{C_1}{C_2}$, $\beta=\dfrac{R^2C_2}{L}$, a, b – параметры модели Чуа, α - варьируемый параметр.

В модель Чуа можно ввести некоторое воздействие u_1, например, в первое уравнение системы

$$\left|\begin{aligned}&\dot{x}=\alpha[y-h(x)]+u_1,\\&\dot{y}=x-y+z,\\&\dot{z}=-\beta y.\end{aligned}\right. \qquad (3)$$

Постановка задачи. Синтезировать такую функцию $u_1(x, y, z)$, которая позволяет придать новые свойства модели (3), т.е. обеспечить асимптотическую устойчивость стационарных состояний системы для любых значений положительных параметров α, β или наделить эту модель новыми типами аттракторов.

Для решения этой задачи используем метод АКАР, основанный на введении некоторой макропеременной $\psi(x, y, z)$ (задается конструктором) и обеспечении свойства асимптотической устойчивости управляемой модели (3) относительно многообразия $\psi = 0$. Это свойство можно обеспечить путем использования функционального уравнения

$$T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \tag{4}$$

где $T_1 > 0$ - задаваемый параметр. Введем следующую макропеременную:

$$\psi_1 = x + \lambda y. \tag{5}$$

где λ - константа, которая выбирается из условия устойчивости декомпозированной системы.

Дифференцируя функцию ψ_1 и подставляя производную в уравнение (4), находим управление:

$$u_1 = -\alpha(y - hx) - \lambda(x - y + z) - \frac{x + \lambda y}{T_1}, \tag{6}$$

которое обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) системы (3), замкнутой обратной связью (ОС) (6), на многообразие $\psi_1 = 0$. Движение по этому многообразию описывается дифференциальными уравнениями, которые можно найти, подставив переменную $x = -\lambda y$ (5) во второе и третье уравнения системы (3). Тогда получим систему дифференциальных уравнений (декомпозированную систему):

$$\begin{cases} \dot{y}_\psi(\mathrm{t}) = -\lambda\, \mathrm{y}_\psi - \mathrm{y}_\psi + \mathrm{z}_\psi; \\ \dot{z}_\psi(\mathrm{t}) = -\beta\, \mathrm{y}_\psi, \end{cases} \tag{7}$$

описывающие поведение системы (3), (6) на многообразии $\psi_1 = 0$. Исследуем устойчивость системы (7) относительно состояния $y_s = z_s = 0$.

Для этого введем следующую определенно-положительную функцию Ляпунова:

$$V_\psi = 0,5y^2\psi + 0,5z^2\psi > 0. \tag{8}$$

Производная по времени функции (8) в силу уравнений (7) равна

$$\dot{V}_\psi(t) = -(1+\lambda)y^2 + (1-\beta)yz < 0. \tag{9}$$

где λ - константа, которая выбирается из условия устойчивости декомпозированной системы (7)

Согласно теореме Ляпунова, если производная $\dot{V}_\psi(t)$ всегда отрицательна, то это означает асимптотическую устойчивость системы (7) относительно стационарного состояния $y_s = z_s = 0$ при движении системы из любых начальных условий. Условие $\dot{V}_\psi(t) < 0$ обеспечивается при

$$\lambda > 0;\ \beta > 0. \tag{10}$$

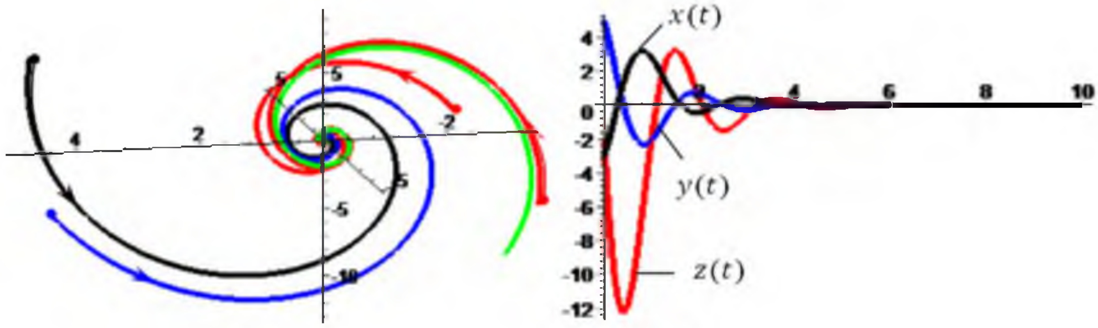
Учитывая, что на многообразии $\psi_1 = 0$ переменная $x = -\lambda y$, то и состояние $x_s = 0$.

Итак, при введении ОС u_1 (6) в (3) при условии (10) и $T_1 > 0$ гарантируется асимптотическая устойчивость стационарного состояния $x_s = y_s = z_s = 0$ в начале координат при любых положительных значениях параметров λ, β системы.

На рис.4 приведены результаты моделирования системы (3), (6) при параметрах $\alpha = 2,2$; $\beta = 10$; $\lambda = 1$; $a = 1/7$; $b = -2/7$, подтверждающие теоретические положения метода

АКАР, полученные в программной среде Maple.

Из рис.4 видно, что система (3) имеет единственное устойчивое стационарное состояние – фокус, и при $\lambda = 0$, в системе сохраняется устойчивый фокус. Таким образом, введение ОС (6) позволяет гарантировать при произвольном $\lambda > 0$ асимптотическую устойчивость в целом, т.е. во всем фазовом пространстве относительно желаемых стационарных состояний.



а) б)

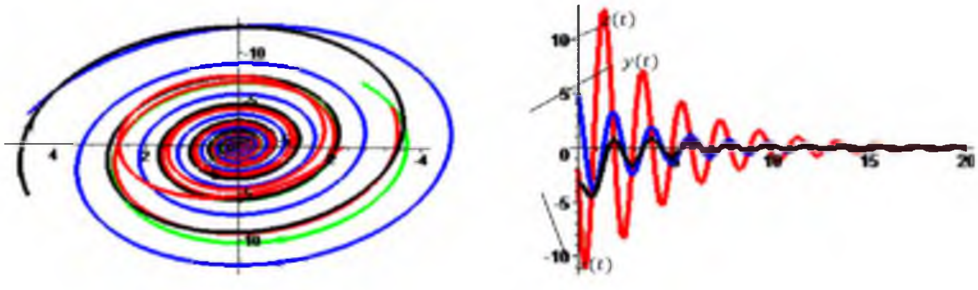
Рис.4. Фазовый портрет (а) и переменные состояния (б) системы (3) и (6) при $\lambda > 0$

Теперь предположим, что коэффициент $\lambda < 0$. Положив $\lambda = -\lambda$, запишем систему уравнений (7) в виде:

$$\begin{cases} \dot{y}_{\psi}(t) = -(1-\lambda)\, y_{\psi} + z_{\psi} \\ \dot{z}_{\psi}(t) = -\beta\, y_{\psi} \end{cases} \tag{11}$$

В зависимости от выбора коэффициента λ в интервале $-1 < \lambda < -5{,}5$, можно придать различные динамические свойства декомпозированной системе (11) и, следовательно, синтезированной замкнутой системе (3) и (6).

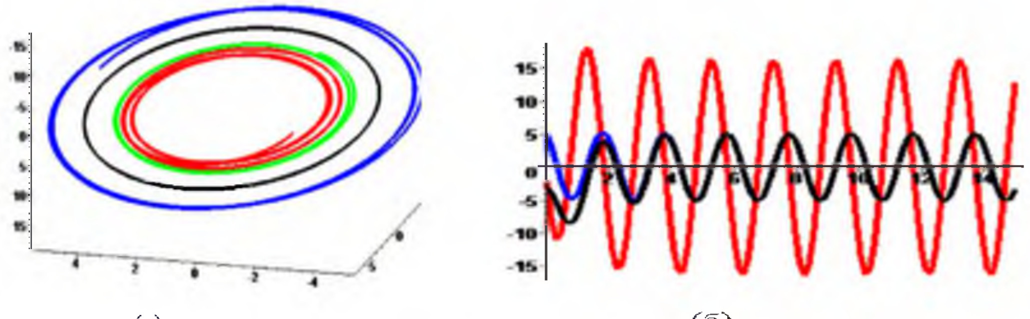
На рис.5 прослеживается разрушение устойчивой системы – фокус. Возбуждаются колебания, происходит бифуркация, первоначально устойчивый фокус переходит в устойчивый «предельный цикл» Андронова-Хопфа.



(а) (б)

Рис.5. Фазовый портрет (а) и переменные состояния (б) систем (3) и (6) при $\lambda = -0{,}5$

Результаты моделирования показали, что разрушение устойчивости системы (рис. 5) приводит к новому ее состоянию: система (3) стала автоколебательной (рис. 6). Далее автоколебательная система (рис. 6) переходит к новому состоянию – неустойчивому фокусу, не зависящему от времени t (рис. 7).



(а) (б)

Рис.6. Фазовый портрет (а) и переменные состояния (б) систем (3) и (6) при $\lambda = -1$

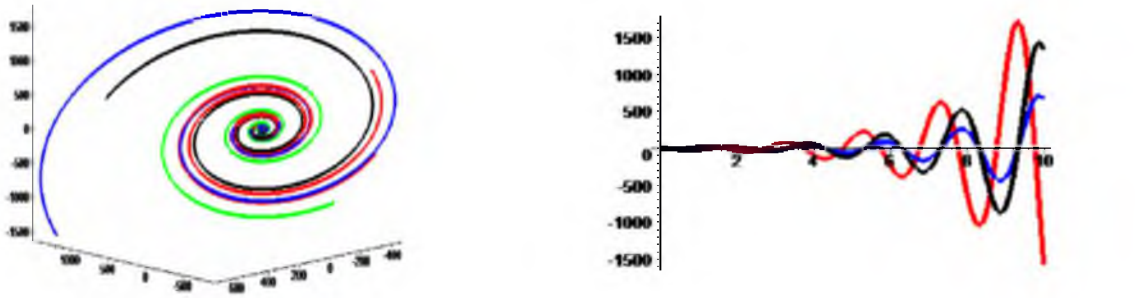


Рис.7. Фазовый портрет (а) и переменные состояния (б) систем (3) и (6) при $\lambda = -2$

Таким образом, введение ОС u_1 позволяет гарантировать при произвольном $\lambda > 0$ асимптотическую устойчивость в целом, т.е. во всем фазовом пространстве, относительно желаемых стационарных состояний $\beta > 0$. При $\lambda < 0$ в системе (3), (6) на многообразии $\psi_1 = 0$ (5) возникают новые типы аттракторов. Это означает, что ОС u_1, введенная в модель Чуа (3), естественным образом отражает идеологию синергетики и теории самоорганизации. Аналогично строится алгоритм упорядочивающего управления нелинейными объектами с моделями современной нелинейной науки [7-9].

Предложенный вычислительный алгоритм законов стабилизирующего управления для ЭО, на примере электротехнической модели Чуа с хаотической динамикой, можно использовать для уточнения описания перемежающейся дуги.

Выводы. Разработан вычислительный алгоритм законов управления методом АКАР для нелинейных ЭО с хаотической динамикой, описываемой электротехнической моделью Чуа. В зависимости от выбранной комбинации между внутренними управляющими параметрами α и внешними управлениями u_1 можно сформировать желаемое протекание технологического процесса с высокими показателями качества.

Список литературы

1. Апышов Дж.А., Бакасова А.Б. Нелинейности в электроэнергетике. – Бишкек, Илим, 2003. – 170 с.

2. Бакасова А.Б. О проблемах управления хаотическими колебаниями в динамических системах // Изв. вузов. – Бишкек, 2011. – №2. – С.26–31.

3. Бакасова А.Б. Синтез сложных систем с нелинейной динамикой и самоорганизацией. – Бишкек, Инсанат, 2014. – 424 с.

4. Бакасова А.Б. Синергетическое управление сложными системами с хаотической динамикой // X Междунар. азиат. школа – семинар «Проблемы оптимизации сложных систем» / СО РАН. – Булан-Соготту, 2014. – С.92–101.

5. Демирчян К.С., Бутырин П.А., Савицки А. Стохастические режимы в элементах и системах электроэнергетики. – М.: Электричество. – 1987. – №3. – С.3–16.

6. Козлов В.Н. Управление энергетическими системами и объединениями в предаварийных режимах – СПб.: Изд-во С-Петерб. ГПУ, 2011. – 479 с.

7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

8. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / под общ. ред. А.А. Колесникова. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.

9. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – 366 с.

10. Сатаркулов, К.А., Исакеева Э.Б. Гипотеза о природе возникновения перемежающегося дугового замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. // Доклады II Междунар. конф. «Проблемы автоматики и управления». – Бишкек, 2007.– С.128-132.

11. Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Абылгазиев Ж.С. Компьютерный анализ процессов в сетях с изолированной нейтралью при хаотическом поведении перемежающейся дуги // Материалы IX Междунар. симпоз. «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – М., 2014. – С. 49–56.

12. Шаршеналиев Ж., Бакасова А.Б. Управление систем хаосодинамикой и самоорганизацией //Вестник КРСУ. Том17, №1, – Бишкек, 2017.– С.66-70.