



УДК 621.3.01

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ ХАОТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕМЕНТАХ И УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**БАКАСОВА А.Б., КЫДЫРМАЕВА З.С.****КГТУ им.И.Раззакова****izvestiya@ktu.aknet.kg**

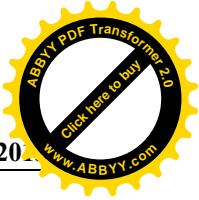
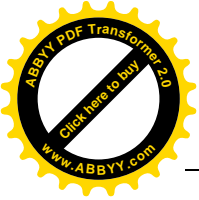
*Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой возможности возникновения хаотических процессов для класса электромеханических устройств, и применение синергетического метода для решения сложной задачи управления нелинейными объектами с хаотической динамикой.*

*Assessing of chaotic processes possibility for a class of electromechanical devices and the use of synergistic method for solving complex control problems of nonlinear objects with chaotic dynamics.*

Многие нелинейные явления в различных областях техносферы не описываются регулярными или простыми диссипативными структурами, а их математические модели допускают значительно более сложные нерегулярные решения, названные динамическим хаосом.

Ключевым в определении динамического хаоса является чувствительность к начальным данным – разбегание за конечное время на конечное расстояние двух бесконечно близких траекторий. Будущее для таких систем является принципиально непрогнозируемым, а прошлое – невозпроизводимым. Если в детерминированной модели будущую траекторию можно предсказать на сколь угодно большое время вперед, зная текущее состояние системы, а в стохастической модели точный прогноз вообще невозможен даже на сколь угодно малое время, то в хаотической модели ошибка прогноза растет экспоненциально и, следовательно, возможен прогноз на ограниченное время вперед, определяемое допустимой ошибкой прогноза [1]. Изучение свойств и особенностей хаотических колебаний в динамических системах потребовало привлечения для их анализа ряда самостоятельных дисциплин и методов, таких как теория нелинейных колебаний, теория динамических систем, теория дифференциальных уравнений, теория возмущения, теория устойчивости и бифуркаций, статистическая теория [3].

Новые синергетические подходы в исследовании динамических систем позволяют выявлять тенденции их процессов к порядку либо хаосу, вскрывать механизмы перехода от порядка к хаосу, изучать хаос и более углубленно анализировать проблему устойчивости [1,3,4,5]. В соответствии с доктриной современной нелинейной науки хаос может играть существенную конструктивную роль и служить источником порядка. Для реализации в



управляемых сложных системах идеи «порядок из хаоса» целесообразно использовать синергетические методы теории аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) для синтеза упорядочивающих объективных законов управления соответствующими технологическими процессами, в которых с возникновением хаотических режимов на определенном интервале времени приводит к значительному улучшению их показателей качества [5,6].

Современные электромеханические системы (ЭМС) представляют собой комплекс различных подсистем, связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. Известно, что многие такие устройства и системы ЭМС являются динамичными, нелинейными, многомерными, многосвязными с наличием взаимодействующих подсистем, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы.

Хаотические режимы таких систем могут быть как нежелательными, так и требуемыми технологическими процессами.

Примером желательности хаотического поведения является технология псевдооживления, широко применяемая при сжигании топлива на электростанциях. Нежелательное хаотическое поведение объектов часто возникает в критических режимах их движения в ЭМС (короткие замыкания, лавина частоты и напряжения, перенапряжения, перемежающаяся дуга, феррорезонансные явления и т.д.).

Преимущественно нелинейный характер объектов современной ЭМС определяет высокую вероятность возникновения в их системах хаотических процессов [2].

Самоорганизация, грубость и ограниченность фазовых областей таких процессов, отражающие свойства механизма функционирования и регулирования объектов и систем электроэнергетики позволяют говорить о хаотических режимах работы последних.

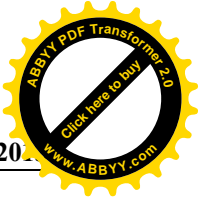
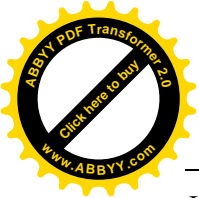
Сложность исследования хаотических режимов обусловлена, прежде всего, отсутствием надежных инженерных методов их идентификации, которая затрудняется ограниченной длительностью наблюдения процессов в реальных системах, возникновением хаотичности зачастую только в узком диапазоне параметров систем, маскировкой этих режимов другими более известными процессами и явлениями [1].

Таким образом, целесообразно обратить внимание на возможную характерность подобных режимов для самых разнообразных устройств и элементов.

Приведем некоторые простые математические модели объектов современной электроэнергетики, которые описывают хаотические режимы.

#### *1. Хаотические процессы в магнитогидродинамических и лазерных установках.*

Процессы в таких уникальных объектах современной энергетики, каким являются магнитогидродинамические (МГД) генераторы и лазеры, обуславливаются весьма тонкими нелинейными физическими эффектами и имеют достаточно сложные математические модели.



Качественное представление об этих процессах дает модель Лоренца, наиболее распространенная в синергетике и теории самоорганизации [7,8].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sigma y - \sigma x, \\ \dot{y}(t) &= -y + rx - xz, \\ \dot{z}(t) &= -bz + xy,\end{aligned}\quad (1)$$

здесь  $\sigma$  и  $r$  — числа соответственно Прандтля и Рэлея.

Как известно, модель Лоренца описывает в зависимости от значений управляющего параметра  $r$  как устойчивые, так и хаотические процессы в различных физических системах. Согласно методу АКАР [8] для решения сложной задачи управления нелинейными объектами с хаотической динамикой в модель Лоренца можно ввести некоторое воздействие  $U_1$ , например, в первое уравнение системы (1):

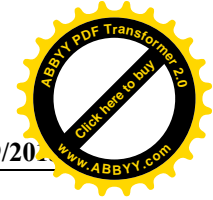
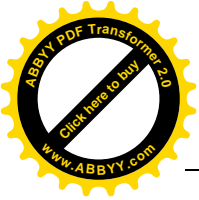
$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sigma y - \sigma x + U_1 \\ \dot{y}(t) &= -y + rx - xz \\ \dot{z}(t) &= -bz + xy\end{aligned}\quad (2)$$

В общем случае  $U_1$  может быть некоторым внешним воздействием. Однако более перспективным является представление  $U_1(x, y, z)$  как некоторой внутренней обратной связи, которую можно дополнительно ввести с целью формирования некоторых желаемых процессов. Ставится задача синтезировать такую функцию  $U_1(x, y, z)$ , которая позволяет придать новые свойства модели (2), например, обеспечить асимптотическую (динамическую) устойчивость стационарных состояний или наделить эту модель (2) новыми типами аттракторов и т.д.

Для решения этой задачи используется метод АКАР [8], основанный на введении некоторой макропеременной  $\psi_1(x, y, z)$  и обеспечении асимптотической устойчивости управляемой модели (2) относительно многообразия  $\psi_1 = 0$ .

Можно в частности, следующим образом построить алгоритм управления объектами с моделью Лоренца [8]. Сначала внешние управления в модели  $U_1$  (2) отключены и выбирается такое значение управляющего параметра  $r$ , чтобы возникал требуемый хаотический режим. По истечении определенного времени включается соответствующее управление, что позволяет стабилизировать хаотический объект или технологический процесс относительно заданного устойчивого состояния. В зависимости от выбранной комбинации между внутренним управляющим параметром  $r$  и внешним управлением  $U_1$  можно сформулировать желаемое протекание технологического процесса с высокими показателями качества. Аналогично можно построить алгоритмы упорядочивающего управления нелинейными объектами с моделью химических реакций Ресслера, электротехнической моделью Чуа, макроэкономической моделью Магницкого и другими моделями современной нелинейной науки.

## 2. Хаотические колебания в системах с синхронными машинами.



Несогласованность параметров отдельных функциональных элементов электроэнергетических систем, резкопеременный характер электрических нагрузок, частые коммутационные явления (включение и отключение линий, трансформаторов и т.д.) и ряд других причин в условиях существенной нелинейности электромеханических характеристик синхронных машин способствуют возникновению длительных нелинейных колебаний различных режимных параметров систем – углов сдвигов роторов, токов и напряжений статоров, мощностей электрических машин, напряжений на выходе автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и т.д. Самовозбуждение, самораскачивание, колебания в асинхронном режиме отдельных синхронных машин ЭМС являются характерными примерами хаотических процессов. При определенных соотношениях параметров элементов систем неустойчивые нелинейные колебания могут локализоваться в некоторых замкнутых областях значений, проявляя при этом хаотический характер.

Например, рассмотрим *хаотические качания неявнополюсной синхронной машины*. Уравнение движения такой идеализированной машины, работающей параллельно с системой неограниченной мощности, без учета процессов в контурах ротора имеет вид [7].

$$\ddot{\delta} + \beta\dot{\delta} + \omega_0^2 \sin \delta = f_0 + a_f \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $\delta = \delta(t)$  – угол положения продольной оси ротора машины относительно вектора напряжения шин системы,  $\beta$  – коэффициент механического и электромеханического демпфирования,  $\omega_0^2$  – собственная частота малых колебаний нерегулируемой и ненагруженной системой машины,  $f_0 = \omega_0^2 \sin \delta_0$  – внешняя сила, определяемая мощностью турбины или двигателя синхронной машины,  $a_f \sin \omega t$  – внешняя сила, соответствующая приложенным к валу машины колебаниям.

Уравнение (3) описывает также при некоторой идеализации колебания в системе двух синхронных генераторов, работающих параллельно на общую нагрузку; в системе двух энергосистем, объединенных слабой межсистемной связью; в синхронных двигателях, питающихся от шин неизменного напряжения; в электрической станции, работающей на приемную систему неограниченной мощности.

Известно, что дифференциальными уравнениями вида (3) описывается динамика и других физических систем: неавтономного маятника, ускорителя заряженных частиц, спутника в плоскости круговой орбиты.

### 3. Хаотические колебания в цепях с параметронами.

Параметроны в электроэнергетике и автоматике применяются в качестве устройств, трансформирующих и стабилизирующих напряжения, обеспечивающих гальваническую развязку цепей, защиту от перенапряжений и коротких замыканий, конвертирование однофазного напряжения в трехфазное, фильтрацию сигналов и т.д. Сложный нелинейный характер этих элементов обуславливает возможность возникновения в цепях с параметронами хаотических

процессов. В частности, в [9] представлены результаты исследования хаотических колебаний в цепи рис.1, содержащей параметрон с параллельными магнитными потоками. Процессы в такой цепи описываются системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_+ + 1/8 k_1 [(\Phi_+^2 + 3\Phi_-^2)\Phi_+ - 8u_0] = A \sin t \\ \ddot{\Phi}_- + k_2 \dot{\Phi}_- + 1/8 (3\Phi_+^2 + \Phi_-^2)\Phi_- = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Phi_+$  и  $\Phi_-$  соответствуют сумме и разности магнитных потоков в сердечниках.

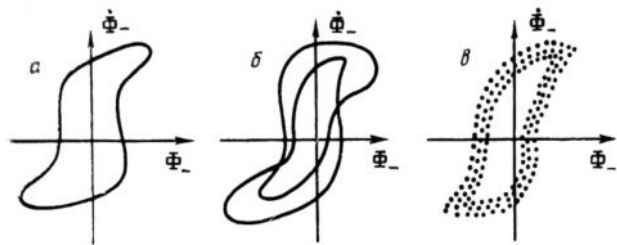
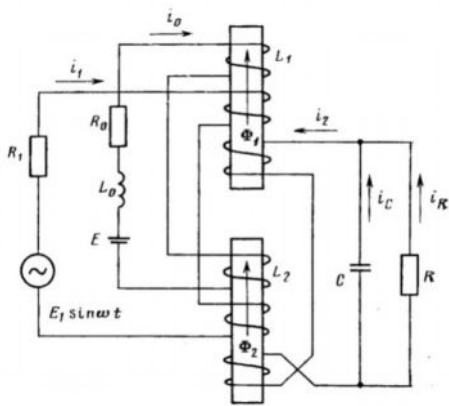


Рис.1

Рис.2



Изменение фазового портрета, иллюстрирующее возникновение странного аттрактора, показано для параметров  $k_1 = 0,26$  и  $k_2 = 0,06$  на рис.2 а, б, в. Почти такой же системой дифференциальных уравнений описывается простейшая цепь с параметроном с перпендикулярными магнитными потоками, для которой также характерна возможность возникновения хаотических колебаний.

4. Хаотические колебания в устройствах с ферромагнитными системами.

Ферромагнитные системы как важный конструктивный элемент дросселей, трансформаторов, двигателей, генераторов и т.д. весьма широко применяются в электротехнике, автоматике, телемеханике и релейной защите. Совместная работа элементов емкостного характера (кабельных линий, конденсаторов или синхронных компенсаторов реактивной мощности, конденсаторов, компенсирующих индуктивные сопротивления линий, симметризаторов и т.д.) и устройств с ферромагнитными системами зачастую приводит к явлениям феррорезонансов. Колебания в окрестностях феррорезонансов могут принять хаотический характер. Процессы изменения магнитного потока в сердечнике катушки индуктивности цепи на рис.3 описываются уравнениями Дуффинга [7]:

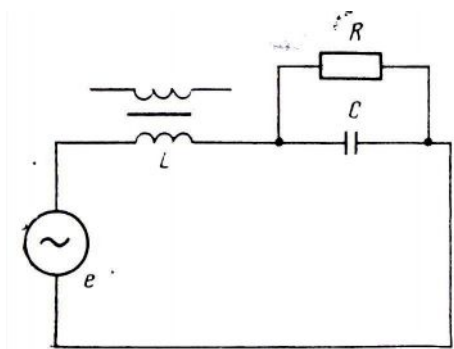


Рис.3

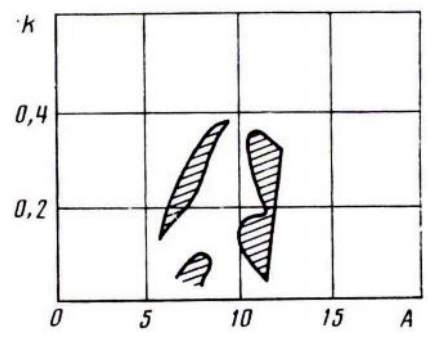


Рис.4

$$\ddot{\Phi} + k\dot{\Phi} + \Phi^3 = A \sin t \quad (5)$$

Согласно исследованиям Хаяси [9], значениям параметра  $A \in (6,5 + 12)$  отвечают неустойчивые решения уравнения (5). Из этой области были выделены подобласти хаотических колебаний, соответствующих странным аттракторам (показаны штриховкой на рис.4). В [9] исследовано возникновение странного аттрактора для решения уравнения

$$\ddot{\Phi} + k\dot{\Phi} + \Phi^3 = A \sin(\omega t + \alpha), \quad (6)$$

описывающего колебания магнитного потока сердечника катушки индуктивности цепи рис.3 в случае, когда он имеет несимметричную характеристику намагничивания или когда существует источник постоянной составляющей магнитного потока.

5. *Переमेжающаяся дуга в электрических сетях.*

Перемежаемостью называют режим чередования во времени почти нерегулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза), наблюдающийся сразу с порогом возникновения хаоса [4].

Перемежающаяся дуга при дуговых замыканиях в сетях с изолированной нейтралью приводит к значительным перенапряжениям сети. Для изучения электрических процессов при дуговых замыканиях (фаза, земля), в частности, с целью выявления возможных перенапряжений и исследования поведения перемежающейся дуги, принимают некоторую модель дугового

замыкания в соответствующих схемах замещения электрической сети. Электрическая дуга в схемах замещения рассматривается как нелинейный элемент, характеризующийся электродинамическими параметрами.

Для моделирования дуги в электрической схеме замещения необходимо учитывать динамическую вольтамперную характеристику дуги (ДВАХ), которая имеет место при переменном токе (рис.5, а). Сложные процессы ионизации в разрядном пространстве приводят к нелинейной зависимости между током и напряжением.

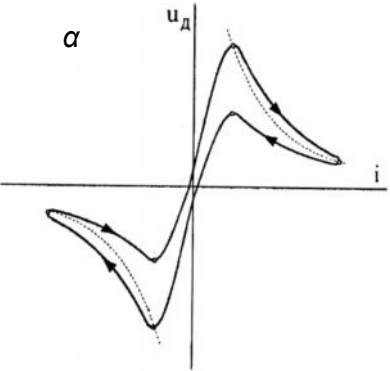


Рис.5

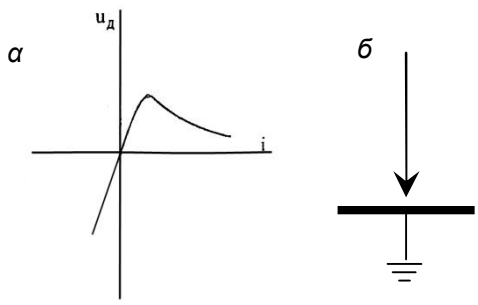


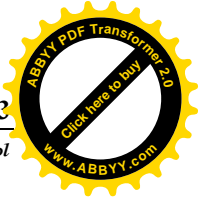
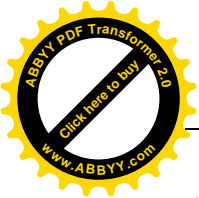
Рис.6

Динамическая вольтамперная характеристика принимается симметричной, если электроды (фаза-земля) одинаковы (рис.5, б). Однако во многих случаях при некотором расстоянии между проводом фазы и землей (или заземленным токопроводящим предметом, на который произошло замыкание) заземляющая дуга горит неустойчиво, хаотически погасая и вновь зажигаясь, в основном, между неодинаковыми электродами.

Эти электроды корректнее представлять в виде системы «игла – плоскость» (фаза – земля) (рис.6, б), следовательно, при моделировании перемежающейся дуги следует воспользоваться ДВАХ, соответствующей характеристике несимметричных электродов (рис.6, а) [10].

Одна из математических моделей ДВАХ - дуги может быть записана в виде [11]

$$u_d(i_d) = U \left( A_0 (1 - \exp(-\alpha |i_d/I_m|)) + |B| (A_1 / (i_d/qI_m + qI_m/i_d) + A_2 / (|i_d/I_m - 1|) \sin(\pi k i_d / I_m)) \right)$$



где  $u_d$  – текущее значение напряжения дуги;  $A_0, A_1, A_2, q$  – коэффициенты аппроксимации, значения которых изменяются во времени по случайному закону;  $B$  – коэффициент, значение которого равно единице при изменении тока дуги от нуля до амплитудного значения, и нулю при уменьшении этого тока от амплитудного значения до нуля;  $I_m$  – амплитудное значение тока дуги для данного цикла плавки (как правило, это наибольший ток, соответствующий данному периоду плавки);  $i_d$  – текущее значение тока дуги;  $k$  – коэффициент, принимающий значения 0, 1, 2, 3;  $\alpha$  – коэффициент аппроксимации, значение которого определяется по методу наименьших квадратов на основании данных, полученных для реальных ДВАХ - дуг.

В данной статье хаотические процессы рассмотрены применительно только к объектам с детерминированными параметрами. В реальной ситуации влияние на объекты электроэнергетики сопредельных устройств и внешней среды носит во многом хаотический характер, что в ещё большей мере способствует возникновению подобных процессов.

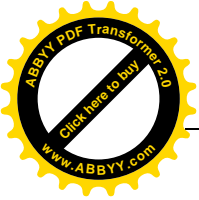
*Вывод.* Хаотические процессы достаточно распространены в целом на практике в системах электроэнергетики, в особенности автономных и слабосвязанных. Их локализация в ограниченных областях режимных параметров, самоорганизация и самоподдерживание (т.е. устойчивость в некотором новом «хаотическом» смысле) не противоречат представлениям об условиях работоспособности систем, позволяют говорить о хаотических режимах и поставить вопрос о пересмотре традиционных для электроэнергетики представлений об устойчивости.

Для эффективного управления, обеспечивающего, по крайней мере, сохранение асимптотической (динамической) устойчивости ЭМС, необходимо рассматривать нелинейные модели энергообъектов и проводить синтез и проектирование систем управления методами, которые в наиболее полной мере позволяют учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов в энергообъектах.

### Литература

1. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. – М.: Наука. 1984г. – 270 с.
2. Апышев Д.А., Бакасова А.Б. Нелинейности в электроэнергетике. – Б., 2003.
3. Мигулин В. В., Медведев В. И., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Основы теории колебаний. Под ред. Мигулина В. В.. Изд. второе. – М.: Наука. 1988г. – 300 с.
4. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. и др. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах.
5. Шаршеналиев Ж., Бакасова А.Б. О некоторых основах системного анализа динамических систем методом синергетического управления. – Бишкек: Известия НАН КР, Илим, 2011, №2.





6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, – М.: Энергоатомиздат, 1994г. – 344с.
  7. Демирчян К.С., Бутырин П.А., Савицкий А. Стохастические режимы в элементах и системах электроэнергетики. – М.: Электричество, №31987г. – с.3-16.
  8. Под общей редакцией Колесникова А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы. – М.: КомКнига, 2006 – 304с.
  9. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. – М.: «Мир», 1968г. – 432 с.
  10. Сатаркулов К.А., Исакеева Э.Б. Гипотеза о природе возникновения перемежающегося дугового замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью.- Бишкек: Проблемы автоматики и управления: Докл. II Межд. конферен., 2007.
- Гудым В.И. Моделирование динамических вольтамперных характеристик дуг переменного тока. Энергетика, 1988г. - №4.