

СТАБИЛИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Логинов С.С., Польский Ю.Е.

Рассматривается подход к стабилизации многомодовых нелинейных динамических систем на примере формирователей колебаний, основанный на обобщенных многомодовых моделях. Показано, что наличие нескольких подходов к разделению нелинейной динамической системы на моды дает возможность рассмотреть решение задачи стабилизации с различных позиций. Приведено два подхода к решению задачи стабилизации динамической системы типа Лоренца, позволяющих обеспечить требуемое поведение системы.

Повышение надежности и безотказности работы формирователей колебаний в системах связи требует обеспечения стабилизации их параметров и характеристик при помощи внешних стабилизирующих воздействий. В зависимости от назначения формирователей колебаний, относящихся к многомодовым нелинейным динамическим системам (ДС), к модовому составу формируемых ими колебаний могут предъявляться различные требования. Так, в традиционных системах связи возникает задача стабилизации регулярных мод, а в перспективных широкополосных системах связи на основе эффектов хаотической динамики – хаотических мод. Для решения указанных задач требуется разработка системного подхода к стабилизации режимов поведения многомодовых ДС. Сопоставительный анализ существующих тенденций системного подхода к решению задач стабилизации ДС показывает, что наиболее целесообразным является его математическая формализация, учитывающая физические принципы построения реальных систем [1-2]. Среди существующих методов математического описания ДС следует выделить описание ДС на основе обобщенных многомодовых моделей [2-3]. Использование обобщенных многомодовых моделей в задачах стабилизации режимов поведения различных ДС может, на наш взгляд, служить основой для выявления новых подходов и методов стабилизации характеристик формирователей колебаний. Целью настоящей работы является разработка подходов к стабилизации режимов поведения и характеристик нелинейных систем и устройств формирования колебаний на основе обобщенных многомодовых моделей (ОММ).

Описание ДС в рамках ОММ предполагает разделение сложной системы на моды состояния,

описывающие состояние ДС (например, структуру плазмы или параметры и характеристики формирователей колебаний) и моды поведения, описывающие динамику ДС (например, регулярный или хаотический режимы поведения сложной системы) [2; 9]. На рис. 1 представлена, уточненная по сравнению с [2; 9], обобщенная многомодовая модель ДС, учитывающая флуктуационные воздействия на моды поведения, ветвления в структуре и различия в характерных временах мод.

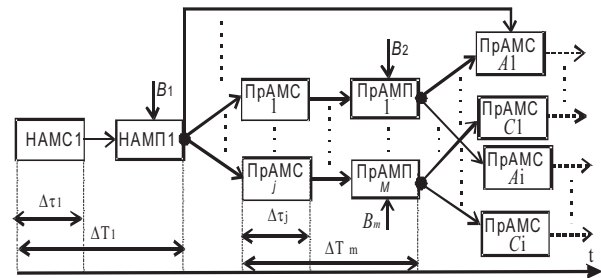


Рис. 1 НАМС – начальный ансамбль мод состояния; НАМП – начальный ансамбль мод поведения; ПрАМС_j – j-й промежуточный ансамбль мод состояния; ПрАМП_M – M-й промежуточный ансамбль мод поведения; • – начало ветвления в структуре обобщенной многомодовой модели; B_i – флуктуационные и внешние (регулирующие, стабилизирующие) воздействия

Следует отметить, что представление сложных ДС в виде набора мод (см. рис.1) не однозначно, причем для отдельных ДС возможны различные подходы к разделению на моды состояния и поведения. Поэтому требуется разработка средств разделения на моды состояния и поведения, адекватных задачам анализа и синтеза стабилизирующих воздействий. Наличие нескольких вариантов разделения ДС на моды дает возможность рассмотреть решение задачи стабилизации с различных позиций. Например, определить наиболее целесообразные для формирователей колебаний пути обеспечения требуемого (регулярного или стохастического) режима поведения и выявить параметры внешнего стабилизирующего воздействия. При этом основным критерием разделения ДС на отдельные моды являются малые величины связей между модами [1].

Для формирователей колебаний моды состояния возможно определить как тип колебаний, обуславливаемый параметрами и характеристиками (например, спектрально-корреляционных и вероятностных) устройства. В простейшем случае возможно различение двух типов мод состояния – регулярных и хаотических. На основе таких мод возможна однозначная диагностика режимов работы устройства. В общем случае возможно различение большего числа регулярных и хаотических мод, определяемых по указанным выше признакам. С другой стороны, под модой состояния возможно понимать параметры и характеристики ДС, описывающие динамику систем и устройств формирования колебаний, например, набор начальных условий, определяющих режим дальнейшего поведения формирователя.

Под модой поведения нелинейных систем и устройств формирования колебаний будем понимать закон (или совокупность законов) изменения ансамбля мод состояния, приводящие к изменению характера поведения ДС.

В рамках ОММ (см. рис. 1) возможно выделить три постановки задачи стабилизации параметров и характеристик ДС:

1. Обеспечение такого ансамбля мод состояния, который с учетом флуктуационных воздействий на моды поведения позволит обеспечить требуемый характер поведения ДС (статическое воздействие).

2. Выявление параметров внешнего динамического воздействия на моды поведения, обеспечивающего требуемые режим поведения ДС при наличии флуктуаций.

3. Обеспечение требуемой динамики сложной системы за счет выявления вида и параметров комбинационного (совместного статического и динамического) воздействия на ДС, учитывающего ветвления в структуре ОММ и различие в характерных временах мод.

В нелинейных устройствах и системах формирования колебаний с динамическим хаосом реализация первого подхода возможна за счет выбора параметров систем и параметров временной дискретизации. Второй подход реализуется, например, за счет введения стабилизирующих воздействий на параметры систем и параметры временной дискретизации.

Вопросы стабилизации хаотических мод на основе первого из указанных выше подходов за счет статического управления параметрами временной дискретизации для систем Ресслера, Анищенко-Астахова, Лоренца, Чуа с хаотической динамикой были рассмотрены в работе [10].

При этом диагностируемые моды различались по корреляционным характеристикам. Наиболее эффективным с точки зрения стабилизации хаотических мод состояния с заданными корреляционными характеристиками является управление параметрами временной дискретизации систем Анищенко-Астахова и Лоренца. Однако статическое управление не всегда реализуемо в формирователях колебаний, что обусловлено возможностью ухудшения некоторых параметров выходного колебания (например, выходной мощности). Наилучшим образом обеспечить требуемую структуру мод состояния возможно путем введения динамических стабилизирующих воздействий.

Необходимо отметить, что при выборе стратегий стабилизации мод поведения НАМП₁ возможны ветвления (см. рис. 1) с переходом от НАМС₁ не только к ПрАМС₁, но и к ПрАМС₂. В случае стабилизации хаотической моды динамической системы Лоренца-ДСЛ (1) за счет квазирезонансных воздействий на параметры систем и параметры временной дискретизации возможен переход не только к новой хаотической моде, но и к регулярной моде в зависимости от глубины стабилизирующего воздействия и начального ансамбля мод состояния. Поэтому одной из важнейших практических задач является обеспечение и стабилизация требуемых режимов этой ДС. В случае квазирезонансной модуляции параметров системы Лоренца с динамическим хаосом

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -\sigma(t)X + \sigma(t)Y; \\ \dot{Y} &= r(t)X - Y - XZ; \\ \dot{Z} &= XY - b(t)Z,\end{aligned}\quad (1)$$

где X, Y, Z – переменные системы; r, b, σ – параметры системы Лоренца, широко используемой для описания таких ДС как лазеры [5], формирователи колебаний на основе эффектов хаотической динамики [6], возможно получение хаотических мод с интервалами корреляции, варьируемыми в пределах одного порядка. При модуляции параметров временной дискретизации на основе квазирезонансных воздействий возможна вариация интервалов корреляции в пределах 20 раз [7].

Одним из критериев выбора параметров стабилизирующего воздействия является обеспечение требуемого режима ДС (с регулярными или хаотическими модами) при минимальных энергетических затратах на его стабилизацию с сокращением временного интервала стабилизации.

Необходимо отметить, что допущение многократных переходов между областями фазо-

вого пространства с различными состояниями равновесия в системах с динамическим хаосом приводит к увеличению переходного процесса установления стабилизированного состояния системы. Однако многократные переходы позволяют повысить энергетическую эффективность управляющих стабилизирующих воздействий на нелинейные устройства и системы с хаотической динамикой [4].

Для повышения энергетической эффективности стабилизирующих воздействий необходимо обеспечивать минимальное удаление фазовой траектории от состояний равновесия системы в случае хаотической динамики системы Лоренца [4]. При минимальных отклонениях фазовых траекторий от состояний равновесия системы глубина стабилизирующих воздействий минимальна, а их энергетическая эффективность максимальна. Минимизация этих отклонений возможна двумя способами:

1. Путем увеличения продолжительности временного интервала стабилизации при допущении многократных переходов между областями фазового пространства с различными состояниями равновесия [4].

2. Путем обеспечения в многомодовой ДСЛ моды состояния с требуемыми начальными условиями в системе, обеспечивающих необходимую минимизацию отклонений фазовых траекторий от точек равновесия системы за времена, не превышающие период квазирезонансных колебаний в системе. Указанные моды состояния, как показано в работе, дают возможность сократить продолжительность временного интервала стабилизации на несколько порядков с одновременным повышением его энергетической эффективности.

Предлагаемое энергетически эффективное стабилизирующее воздействие на ДСЛ осуществлялось в работе путем задания особого начального ансамбля мод состояния (рис.1) при квазипериодических импульсных квазирезонансных воздействий (КР) вида

$$\xi = \xi_0 + \Delta \cos \omega t, \quad \omega > \Omega, \quad \frac{\Delta}{\xi_0} \ll 1, \quad (2)$$

где ξ_0 - один из параметров динамической системы типа Лоренца r или b ; Ω - частота квазирезонансных колебаний [4]. Оценка оптимальных параметров этих воздействий производилась по возможности стабилизации ДСЛ с динамическим хаосом при задании начальных условий (X_n, Y_n, Z_n) и действии на систему квазипериодических импульсных КР воздействий, с амплитудой m , достаточной для стабилизации ДСЛ без

смен фазовой траекторией областей с различными состояниями равновесия, при допустимом начальном отклонении системы от положения равновесия, не превышающем 5% [8].

На основе численного моделирования ДСЛ (1) получена оценка границ области фазового пространства ДСЛ, определяющих моду состояния ДСЛ, обеспечивающую стабилизацию системы с минимальными энергозатратами на КР воздействия и сокращением продолжительности временного интервала стабилизации. Для значений $R = 28$, $b = 8/3$, $\sigma = 10$ и $\Delta/r_0 \in [0,01; 0,1]$ протяженность области начальных условий ДСЛ определяется установленными неравенствами:

$$\begin{aligned} 26 \leq X_n \leq 28; \\ 4 < Y_n < 17; \\ 48 \leq Z_n < 50. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом значение безразмерного времени $t_0 = \frac{T_{\text{стаб}}}{T_{\text{кол}}}$, за которое достигается стабилизация ДСЛ, составляет не более $t_0 \sim 0,3 \div 0,7$; где $T_{\text{кол}}$ - собственный период колебаний системы (1), $T_{\text{стаб}}$ - время, за которое достигается стабилизация ДСЛ.

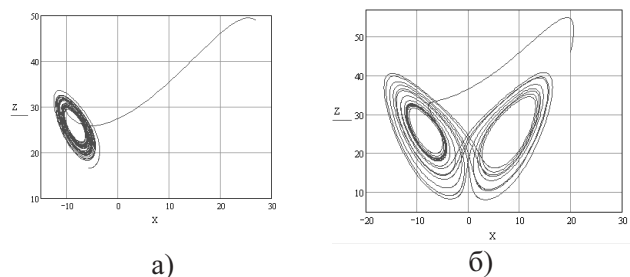


Рис. 2. Фазовый портрет ДСЛ (1) при $\Delta/r_0 = 0.01$; $m = 0.1$; $|\vec{r}| = 57$:

а) $X_n = 27$, $Y_n = 12$, $Z_n = 49$;

б) $X_n = 20$, $Y_n = 28$, $Z_n = 46$.

Результаты численного моделирования ДСЛ (1), подвергаемой стабилизирующим КР воздействиям при различных модах состояния (задаваемых различными начальными условиями, рис. 2а и рис. 2б) показали, что при сохранении величины радиус-вектора начальных отклонений от состояний равновесия

$$|\vec{r}| = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2}, \quad (3)$$

возможно обеспечение как регулярного (см. рис. 2а), так и хаотического (см. рис. 2б) режимов поведения рассматриваемой ДСЛ при одних и тех же уровнях КР воздействий.

Обеспечение начальных условий ДСЛ (1), принадлежащих ДСЛ (1) в выявленной области фазового пространства ($26 \leq X_n \leq 28$, $4 < Y_n < 17$, $48 \leq Z_n < 50$) с заданием требуемой величины $|r|$, возможно за счет специального предварительного импульсного воздействия на систему. Примером этого воздействия может служить импульсная предыонизация плазмы в системах возбуждения газовых лазеров с несамостоятельным разрядом [10].

Анализ подходов к стабилизации нелинейных устройств и систем формирования колебаний на основе ОММ и различного разделения мод (состояния и поведения) в ДС позволяет сформулировать следующие выводы:

– на основе задания мод состояния, связанных с типом выходного колебания показано, что в случае квазирезонансной модуляции параметров системы Лоренца возможно получение хаотических мод с интервалами корреляции, варьируемыми в пределах одного порядка; при модуляции параметров временной дискретизации на основе квазирезонансных воздействий возможна вариация интервалов корреляции в пределах 20 раз;

– на основе задания моды состояния, определяемой начальными условиями формирователей колебаний на базе ДСЛ, установлена оптимальная мода состояния $26 \leq X_n \leq 28$, $4 < Y_n < 17$, $48 \leq Z_n < 50$. При обеспечении попадания начальных условий в оптимальную моду состояния за счет предварительного однократного импульсного воздействия, и последующем действии на систему квазипериодических импульсных КР воздействий, возможно обеспечение требуемого стабильного режима поведения ДСЛ с минимальными энергетическими затратами на стабилизацию за интервалы времени, не превышающие период собственных колебаний ДС $t_0 \approx 0,3 \div 0,7$.

Таким образом, многомодовый подход с разделением различных мод состояния и поведения является эффективным средством оптимизации стабилизирующих воздействий на нелинейные формирователи колебаний в системах связи на основе нелинейных ДС с хаотической динамикой. Обеспечение требуемого режима формирователей колебаний на базе систем с динамическим хаосом при помощи предлагаемых управляющих воздействий позволяет повысить их надежность и безотказность работы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаменталь-

ных исследований (заявленный проект РФФИ №09-08-00268-а).

Литература

1. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Физические фракталы, структуры, моды // *Нелинейный мир*. №2, 2008. – С.110-113.
2. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Обобщенные многомодовые модели в анализе и диагностике фрактальных структур, живых и неживых динамических систем // «Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы». Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 456 с.
3. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Анализ и диагностика процессов формирования сложных структур на основе обобщенной многомодовой модели // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. №3, 2008. – С.69-71.
4. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е. Методы анализа, диагностики и управления поведением нелинейных устройств и систем с фрактальными процессами и хаотической динамикой. Казань: Изд. КГТУ, 2004. – 218с
5. Ораевский А.Н. Мазеры, лазеры и странные аттракторы // *Квантовая электроника*. Т.8, № 1, 1980. – С. 130-142.
6. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд. физ.-мат. лит., 2002. – 252 с.
7. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Формирование псевдослучайных сигналов с управляемыми корреляционными характеристиками на основе систем с динамическим хаосом // *ИКТ*. Т.6, № 2, 2008. – С. 19-22.
8. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е., Ценцевичский А.А. Влияние зеркальных переходов на фазовой плоскости на эффективность управления поведением динамической системы Лоренца // «Электронное приборостроение». Прилож. к журналу «Вестник КГТУ (КАИ)». Вып. 4(20), 2001. – С.16-21.
9. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Диагностика устройств систем связи и стабилизация их статистических характеристик на основе обобщенной многомодовой модели // Доклады IX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», посвящ. 100-летию со дня рождения акад. В.А. Котельникова и 120-летию телефонной связи в Татарстане. Казань, 2008. – С.53-57.
10. Польский Ю.Е., Айбатов Л.Р., Хохлов Ю.М. // *Квантовая электроника*. Т.12, №7, 1085. – С. 1459-1464.