

Обобщенная синхронизация связанных пучково–плазменных систем, моделируемых в рамках РС-метода, с позиций расчета спектра показателей Ляпунова

Н.С. Фролов^{1,3,*}, А.А. Короновский^{2,3,†}, А.Е. Руннова^{3,‡}, А.Е. Храмов^{1,3,§}

¹Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра электроники, колебаний и волн
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83, корп. 8

²Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83, корп. 8

³Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем»
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77, корп. 5

В данной работе рассматривается модификация метода расчета показателей Ляпунова для связанных автоколебательных систем в рамках РС-метода — одного из наиболее эффективных подходов для численного моделирования пучково-плазменных систем, содержащих интенсивные электронные потоки. Изучение спектров показателей Ляпунова позволит изучать нелинейные процессы, протекающие в цепочках и сетях связанных пространственно-распределенных автоколебательных систем, а также давать точную оценку порогу возникновения обобщенной синхронизации взаимодействующих автогенераторов.

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Jn, 05.45.Pq, 05.45.Xt.

УДК: 517.9, 530.182, 533.9.

Ключевые слова: сложные сети, обобщенная синхронизация, метод частиц в ячейке, показатели Ляпунова, пучково-плазменные системы.

Хаотическая синхронизация представляет собой важное фундаментальное явление, которое находит широкое практическое применение [1]. В частности, хаотическая синхронизация используется для управления динамикой сложных связанных систем [2, 3] и для скрытой передачи информации [4]. Также одно из перспективных направлений применения данного явления на практике - это генерация и приём сложных сигналов гига- и терагерцового диапазонов частот с использованием нелинейных антенн [5]. Последние представляют собой совокупность объединенных в сеть СВЧ генераторов, демонстрирующих сложную пространственно-временную динамику. В качестве таких устройств могут применяться твердотельные приборы или приборы электронно-волновой и пучково-плазменной природы [6]. Известно, что в такой сети связанных автоколебательных систем могут быть реализованы многие нелинейные явления, включая синхронизацию [7, 8], поэтому существует необходимость в разработке и применении новых методик анализа и контроля сложных и нетривиальных эффектов коллективного взаимодействия связанных колебательных систем для создания нелинейных антенн [9].

Одним из подходов, позволяющих проводить количественную оценку динамики как автономных, так и неавтономных колебательных систем является расчет спектра показателей Ляпунова. Данный метод анализа

сложного поведения колебательных систем хорошо зарекомендовал себя при исследовании динамики систем с сосредоточенными параметрами, имеющих радиофизическую природу, а также при рассмотрении пучково-плазменных и электронно-волновых пространственно-распределенных систем, описываемых в рамках приближения сплошной среды [10]. Однако, системы, содержащие электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитным полем, не всегда удается описать, используя уравнения гидродинамики. Одним из наиболее эффективных способов моделирования пучково-плазменных систем является метод крупных частиц (РС-метод), разработанный в середине 50-х годов прошлого века [11, 12]. Применение подхода для расчета показателей Ляпунова, описанного в [13], позволяет проводить анализ колебательных режимов в системах, моделируемых в рамках метода крупных частиц.

В данной работе рассматривается модификация метода расчета показателей Ляпунова для автоколебательных систем в рамках РС-метода, позволяющая изучать нелинейные процессы, протекающие в цепочках и сетях связанных пространственно-распределенных автоколебательных систем. В частности, применение данного подхода дает возможность точно оценить границы различных типов синхронизации при варьировании управляющих параметров, а также величины параметра связи; изучить сценарии перехода к синхронной динамике, характерные для исследуемой системы; дать количественную оценку процессам, протекающим в связанных пространственно-распределенных автоколебательных средах.

В представленной работе с помощью расчета спектра показателей Ляпунова были исследованы числен-

*E-mail: phrolovns@gmail.com

†E-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

‡E-mail: anefila@gmail.com

§E-mail: hramovae@gmail.com

ные модели цепочек и сетей различной топологии, составленных из генераторов на виртуальном катоде (ВК). Использование данного класса СВЧ приборов в качестве модулей для создания нелинейных антенн представляется перспективным в силу широкой полосы спектра выходных колебаний, благодаря сложным нестационарным процессам, протекающим в электронном потоке в режиме формирования ВК, а также легкости перестройки режима колебаний за счет варьирования величины управляющего параметра [14].

В ходе проведенного исследования было изучено поведение границы синхронной динамики в цепочках и сетях генераторов на ВК. В частности была построена зависимость порогового значения коэффициента связи от управляющего параметра для установления режима обобщенной синхронизации. Также для случая двух однонаправленно связанных виркаторов проведено сравнение с другим методом диагностики обобщенной синхронизации — методом вспомогательной системы [15]. Было показано, что точность оценки порогового значения параметра связи с помощью построения спектра показателей Ляпунова значительно выше, нежели при использовании метода вспомогатель-

ной системы. При исследовании сетей связанных генераторов на ВК с помощью спектра показателей Ляпунова был выявлен эффект кластерной синхронизации. Данный эффект был исследован более детально с позиций синхронизации временных масштабов при помощи попарного анализа разностей фаз вейвлетного преобразования сигналов взаимодействующих виркаторов [16]. Показано, что кластерная синхронизация наблюдается в сетях с различными топологиями связей и является общим эффектом, наблюдаемым при взаимодействии в сети пространственно-распределенных автоколебательных систем пучково-лазменной природы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и науки в рамках государственного задания высшим учебным заведениям на 2014 год и плановый период 2015 и 2016 годов в части проведения НИР (СГТУ-141, СГТУ-146), РФФИ (проекты 14-02-31204, 12-02-33071, 12-02-00345) и Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (МД-345.2013.2).

-
- [1] *Pikovsky A.S. et al* Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. (Cambridge University Press, 2001).
- [2] *Nijmeijer H.* Physica D-Nonlinear phenomena. **154**. P. 219. (2001).
- [3] *Hramov A.E. et al.* Chaos. **15**. 013705. (2005).
- [4] *Moskalenko O.I. et al.* Phys. Lett. A. **374**. P. 2925. (2010).
- [5] *Meadows B.K. et al.* Proc. IEEE. **90**. P. 882. (2002).
- [6] *Ram R., Sporer R.* IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. P. 324. (1996).
- [7] *Vadivasova T.E. et al.* Phys. Rev. E. **63**. 036225. (2001).
- [8] *Filatov R.A. et al.* Phys. Lett. A. **358**. P. 301. (2006).
- [9] *Ditto W.L. et al.* Phys. Rev. Lett. **65**. P. 3211. (1990).
- [10] *Hramov A.E. et al.* Physics of Plasmas. **19**, N. 8. 082302. (2012).
- [11] *Harlow F.H.* Los Alamos scientific laboratory. LA-2139. (1957).
- [12] *Birdsal C.K., Langdon A.B.* Plasma physics, via computer simulation. (NY: McGraw-Hill, 1985).
- [13] *Фролов Н.С. и др.* Изв. РАН. Сер. физическая. **78**, В. 2. С. 237. (2014).
- [14] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков, Т.2. (М.: Физматлит, 2004).
- [15] *Abarbanel H.D.I. et al.* Phys. Rev. E. **53**, N. 5. P. 4528. (1996).
- [16] *Moskalenko O.I., Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* Eur. Phys. J. Special Topics. **222**. P. 2571. (2013).

Generalized synchronization of coupled beam-plasma systems, simulated within the framework of PIC-method, in terms of Lyapunov exponents spectrum calculation

N.S. Phrolov^{1,3,a}, A.A. Koronovskii^{2,3,b}, A.E. Runnova^{3,c}, A.E. Hramov^{1,3,d}

¹Department of Electronic, Oscillations and Waves, Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University. Saratov 410012, Russia

²Department of Physics of Open Systems, Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University. Saratov 410012, Russia

³Scientific Educational Centre «Nonlinear Dynamics of Complex Systems», Saratov State Technical University. Saratov 410054, Russia

E-mail: ^aphrolovs@gmail.com, ^balexey.koronovskii@gmail.com ^canefila@gmail.com, ^dhramovae@gmail.com

The modification of Lyapunov exponents spectrum calculation approach for coupled self-oscillating systems, simulated within the framework of PIC-method (the most efficient approach for numerical simulation of beam-plasma systems with intensive electron flows), is suggested in this work. The analysis of Lyapunov exponents spectrum allows to study the nonlinear progressing in chains and networks of coupled spatially-extended self-oscillating systems and estimate the exact bound of generalized synchronization of interacting generators appearance.

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Jn, 05.45.Pq, 05.45.Xt.

Keywords: complex networks, generalized synchronization, particle-in-cell method, Lyapunov exponents, plasma-beam-systems.

Сведения об авторах

1. Фролов Никита Сергеевич — аспирант, младший научный сотрудник; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: rhrlovns@gmail.com.
2. Короновский Алексей Александрович — докт.физ.-мат.наук, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
3. Руннова Анастасия Евгеньевна — канд.физ.-мат.наук, научный сотрудник; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: anefila@gmail.com.
4. Храмов Александр Евгеньевич — докт.физ.-мат.наук, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: (8452) 52-38-64, e-mail: hramovae@gmail.com.