DOI: 10.17117/na.2015.12.02.441

Поступила (Received): 25.12.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.12.02.441.pdf>**Антипов О.И.****Получение временных бифуркационных диаграмм с помощью математической модели импульсного повышающего стабилизатора напряжения****Antipov O.I.****Preparation time bifurcation diagrams using a mathematical model of buck converter**

В данной работе представлена математическая модель реального импульсного стабилизатора напряжения, которая при определенных параметрах системы путем имитации некоторых паразитных явлений позволяет получить бифуркационную диаграмму, где в качестве параметра бифуркации выступает время. Полученная модель позволит исследовать явление детерминированного хаоса в неравновесных динамических системах с точки зрения временных бифуркационных диаграмм, являющихся следствием искусственно введенного в них явления перемежаемости

Ключевые слова: детерминированный хаос, математическая модель, неравновесные системы, повышающий стабилизатор, перемежаемость

Антипов Олег Игоревич

Доктор физико-математических наук, профессор
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

This paper presents a mathematical model of a real boost converter, which, under certain parameters of the system and simulating some parasitic phenomena provides a bifurcation diagram, where the bifurcation parameter its time. The resulting model allows to study the phenomenon of deterministic chaos in nonequilibrium dynamical systems with regard to the time of bifurcation diagrams resulting from artificially introduced in them the phenomenon of intermittency

Key words: deterministic chaos, mathematical model, nonequilibrium systems, boost converter, intermittency

Antipov Oleg Igorevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor
Volga state university of telecommunications and
informatics
Samara, L. Tolstoy st., 23

Основное внимание в литературе по детерминированному хаосу уделялось тому, что можно было бы назвать «стационарными» хаотическими колебаниями [7]. Двумя другими формами непредсказуемых, нерегулярных движений являются перемежаемость и переходный хаос. В случае перемежаемости всплески хаотического движения, или шума, чередуются с периодами регулярного движения. Такое поведение наблюдал еще Рейнольдс в своих экспериментах по изучению предтурбулентного режима в трубах (1883 г.) (см. работу Сринивасана

[8]). Переходный хаос наблюдается также в некоторых системах как предвестник стационарного хаоса. При определенных начальных условиях система может вести себя квазислучайным образом, т. е. ее траектории могут двигаться в фазовом пространстве, как если бы они находились на странном аттракторе, но через некоторое время движение выходит на регулярный аттрактор, как в случае периодических колебаний. Иногда для экспериментального определения критического параметра для перемежаемости и переходного хаоса используются свойства подобия нелинейного движения. В случае перемежаемости, когда поведение системы близко к периодическому движению, но время от времени претерпевает короткие всплески переходного хаоса, объяснение такого поведения в терминах одномерных отображений, или разностных уравнений, была дано Манневилем и Помо [11]. Для непрерывных систем жесткий переход к хаосу организовать сложно, поскольку аттрактор претерпевает множество метафор перед выходом на единый хаотический аттрактор [6].

В данной работе решалась задача искусственного получения временных бифуркационных диаграмм (БД), где в качестве параметра бифуркации выступает время, с помощью явления перемежаемости. Идея практической реализации нерегулярного хаоса была взята из [10]. В этой работе нерегулярный хаос был получен для импульсного стабилизатора напряжения (ИСН) понижающего типа с обратной связью по выходному напряжению при искусственном введении в модель системы пульсаций малой величины.

В данной работе рассмотрена система повышающего ИСН имеющего одну обратную связь по максимальному току дросселя и одну обратную связь по напряжению выхода [9]. Функциональная схема данной системы представлена на рис. 1, а математическое описание её работы данной системы было дано в [5]. Уравнения состояния повышающего ИСН для замкнутого силового ключа имеют следующий вид:

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 U_1$$

$$\text{где } x_1 = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ u_1(t) \\ u_{cf1}(t) \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{fN}R_1} & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{oc}R_1} + \frac{1}{C_{oc}R_2} \end{bmatrix}, U_1 = \begin{bmatrix} U \\ U_{ir} \end{bmatrix}.$$

Здесь $i_1(t)$ и $u_1(t)$ – ток дросселя L и напряжение конденсатора C при замкнутом ключе, $u_{cf1}(t)$ – напряжение на корректирующем конденсаторе обратной связи C_{fN} , R – сопротивление нагрузки, R_1 и R_2 – сопротивления резисторов делителя напряжения. Уравнения состояния повышающего ИСН для разомкнутого силового ключа имеют следующий вид:

$$\dot{x}_0 = A_0 x_0 + B_0 U_0,$$

где

$$x_0 = \begin{bmatrix} i_0(t) \\ u_0(t) \\ u_{cf0}(t) \end{bmatrix}, A_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{i\tilde{N}}R_1} & 0 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{oc}R_1} + \frac{1}{C_{oc}R_2} \end{bmatrix}, U_0 = \begin{bmatrix} U \\ U_{ir} \end{bmatrix}.$$

Здесь $i_1(t)$ и $u_1(t)$ – ток дросселя L и напряжение конденсатора C при замкнутом ключе, $u_{cf0}(t)$ – напряжение на корректирующем конденсаторе обратной связи $C_{i\tilde{N}}$. Решение обеих систем уравнений, а также принципы построения на основе решений математической модели приведены в работе автора [5]. Решение удалось получить в аналитическом виде, поскольку не был произведен учет активных потерь в реактивных элементах системы [4].

Рис. 1. Функциональная схема повышающего ИСН с обратными связями по напряжению выхода и максимальному току дросселя. Здесь УПТ – усилитель постоянного тока, Комп. – компаратор, ЗГ – задающий генератор

Применительно к системе, рассматриваемой в данной работе искусственное введение перемежаемости выглядело следующим образом. К напряжению опорного источника U_{ir} были добавлены пульсации с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$. Значение частоты f_0 должно отличаться от частоты задающего генератора f на некоторую величину Δf , значение которой напрямую влияет на длительность межаотичного устойчивого режима работы. Сначала система без добавления пульсаций была промоделирована вплоть до полностью устойчивого режима, чтобы исключить всякие влияния переходного процесса. Далее значения переменных состояния являлись начальными условиями для последующего моделирования. После этого в систему вводились пульсации заменой постоянного значения опорного напряжения U_{ir} функцией времени

$$U_{ir}(t) = (1 + \theta \sin(\omega_0 t)) U_{ir},$$

где θ – амплитуда вводимых пульсаций. Чтобы система периодически выходила в хаотический режим величину U_{ir} следует выбирать из устойчивого участка бифуркационной диаграммы при значениях достаточно близких к границе устойчивости. Для получения более точного значения границы устойчивости ИСН с дополнительной связью по напряжению система была промоделирована для случая, когда напряжение компенсации присутствует еще раз, но только более подробно в районе границы устойчивости. На основании этой диаграммы и путем практического подбора было выбрано значение опорного напряжения $U_{ir} = 2.7$ В. Сами же бифуркационные диаграммы были получены путем фиксирования значений тока дросселя $i(nT)$ и напряжения конденсатора $u(nT)$ в начале каждого периода. Для наглядности бифуркационных диаграмм было выбрано значение $\Delta f = 10$ Гц, и соответственно отсюда $f_0 = 25010$ Гц. Благодаря несложным вычислениям можно определить, что этих значениях Δf и f периодичность появления хаотических всплесков составит $T_0 = 0.1$ сек, поэтому длительность фиксации бифуркационных диаграмм составила 0.2 сек. после выхода системы в установившееся состояние. На рис. 2а представлена временная бифуркационная диаграмма для тока дросселя при $\theta = 0.1$, т.е. когда величина пульсаций составляет 0.1% от величины напряжения опорного источника U_{ir} , что примерно соответствует 2.7 мВ. Бифуркационная диаграмма для напряжения конденсатора, т.е. выходного напряжения при тех же значениях величины θ представлена на рис. 2б. Хотелось бы отметить, что пульсации такой величины вполне могут быть вызваны электромагнитными помехами. Из этих диаграмм видно, что система переходит из устойчивого состояния в каскад бифуркаций удвоения периода и возвращается обратно.

Подобные математические модели удобны для апробации различных фрактальных методов детерминированного хаоса с последующим их применением в различных областях науки, например, в медицине [1, 2] и экономике [3].

Рис. 2. Периодические временные бифуркационные диаграммы повышающего ИСН для тока дросселя (а) и напряжения выхода (б)

В результате получена работоспособная модель, позволяющая получать бифуркационные диаграммы для конкретной дискренто-нелинейной неравновесной системы – повышающего ИСН с обратными связями по напряжению выхода и максимальному току дросселя, где в качестве параметра бифуркации выступает время. Последующий анализ подобных моделей уже позволил автору применить некоторую методологию фрактального анализа в область решения конкретных задач для биологических и экономических систем.

Список используемых источников:

1. Антипов О.И., Захаров А.В., Антипова Т.А., Мачихин В.А. Применение кросскорреляционной функции к локализации источника ЭЭГ-паттерна // Клиническая и профилактическая медицина: опыт и новые открытия. Киров, 2014. С. 175-177.
2. Антипов О.И., Захаров В.А., Пятин В.Ф., Антипова Т.А. Повышение эффективности обнаружения иррадиационных воздействий от сетчатки глаза путем обработки электроэнцефалограммы методами нелинейной динамики // Клиническая и профилактическая медицина: опыт и новые открытия. Киров: МЦНИП, 2013. С. 177-180.
3. Антипов О.И., Ивахник В.В., Неганова Е.В., Неганов В.А. Фрактальный анализ динамики цен на драгоценные металлы // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 2. С. 110-116.
4. Антипов О.И., Неганов В.А. Влияние учета активных потерь на детерминированный хаос в импульсном стабилизаторе напряжения инвертирующего типа // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 4. С. 48-55.
5. Антипов О.И., Неганов В.А. Детерминированный хаос в импульсном стабилизаторе напряжения повышающего типа в режиме управления по току с дополнительной обратной связью по напряжению // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10. № 9. С. 73-79.
6. Антипов О.И., Неганов В.А., Панферова Т.А. Нелинейная динамика и хаотические явления в нематическом жидком кристалле // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т. 9. № 4. С. 76-87.
7. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных сотрудников и аспирантов. М.: Мир, 1990. 312 с.
8. Шустер. Детерминированный хаос: Введение. М.: Мир, 1998. 240 с.
9. Fang C.C., Abed E.H. Sampled-Data Modeling and Analysis of Closed-Loop PWM DC-DC Converters. 1998 ISR, TR98-24. P. 24-27.
10. Chi K. Tse, Yufei Zhou, Francis C. M. Lau, Shui-Sheng Qiu. "Intermittent" Chaos And Subharmonics In Switching Power Supplies. 2003. Proceedings of IEEE. Vol. III. P. 332-335.
11. Manneville P., Pomeau Y. Different Ways to Turbulence in Dissipative Dynamical Systems. 1980, Physica. Vol. 1D. P. 219-226.

© 2015, Антипов О.И.

Получение временных бифуркационных диаграмм с помощью математической модели импульсного повышающего стабилизатора напряжения

© 2015, Antipov O.I.

Preparation time bifurcation diagrams using a mathematical model of buck converter