



**АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ СОСТАВНОГО СТАБИЛИЗАТОРА,
СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ Понижающих КОНВЕРТОРОВ,
СВЯЗАННЫХ ПО СХЕМЕ ВЕДУЩИЙ-ВЕДОМЫЙ,
ПРИ ПОМОЩИ ФРАКТАЛЬНЫХ МЕР
ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА**

О.И. Антипов

Рассматривается работа составного стабилизатора напряжения, состоящего из двух понижающих конверторов, связанных по схеме ведущий-ведомый, в хаотическом режиме. Для качественного анализа динамики системы построены бифуркационные диаграммы. Количественный анализ хаотических режимов был проведен путем расчета основных и специальных фрактальных размерностей.

Ключевые слова: Хаос, странные аттракторы, дробная размерность.

Введение

Развитие современных источников вторичного электропитания постоянно стимулируется регулярным повышением требований потребителей постоянного стабильного напряжения к его качеству. Одновременно с этим растут потребляемые мощности, что ставит задачу разработки высокомоощных, но одновременно с этим высококачественных источников питания. Одним из решений возникшей из-за этого проблемы является построение составных стабилизаторов, состоящих из двух или более параллельно соединенных конверторов одного типа. Одним из вариантов таких систем является составной стабилизатор, состоящий из двух параллельных понижающих конверторов, соединенных по схеме ведущий-ведомый, работающих в синхронном режиме. Особенностью его функционирования является наличие неравнозначных цепей обратной связи. Кроме того, параметры элементов силовой части подобных составных стабилизаторов различны. Данная ситуация будет не только подробно рассмотрена ниже, но и проанализирована с помощью фрактальных мер. Проведенный анализ позволил исследовать факторы, влияющие на устойчивость составного стабилизатора с точки зрения возникновения хаотических колебаний.

1. Математическая модель связанных понижающих конверторов с учетом различных потерь

Функциональная схема исследуемого стабилизатора представлена на рис. 1. Подобное описание принципов работы схемы можно найти в [1–3]. Приведенные ниже результаты отличаются только тем, что содержат учет большего числа потерь.

Вектор состояния для данной системы имеет вид

$$x(t) = [u(t), i_1(t), i_2(t)]^T,$$

где $u(t)$ – выходное напряжение сдвоенного стабилизатора, $i_1(t)$ – ток дросселя L_1 , $i_2(t)$ – ток дросселя L_2 . В зависимости от состояния ключей $VT1$ и $VT2$ силовая часть сдвоенного стабилизатора может иметь четыре состояния. Когда оба транзистора открыты, силовая часть имеет вид, представленный на рис. 2, а. При этом матричная система с учетом потерь может быть описана выражением

$$\frac{d}{dt}x(t) = A_1x(t) + B_1, \tag{1}$$

где

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} \\ \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) - \frac{1}{L_1} \left(r_{L1} + r_{T1} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{R_H r_C}{L_1(R_H + r_C)} & \\ \frac{1}{L_2} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) & -\frac{1}{L_2} \left(\frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{1}{L_2} \left(r_{L2} + r_{T2} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(U - U_{T1})}{L_1} & \frac{(U - U_{T2})}{L_2} \end{bmatrix}^T.$$

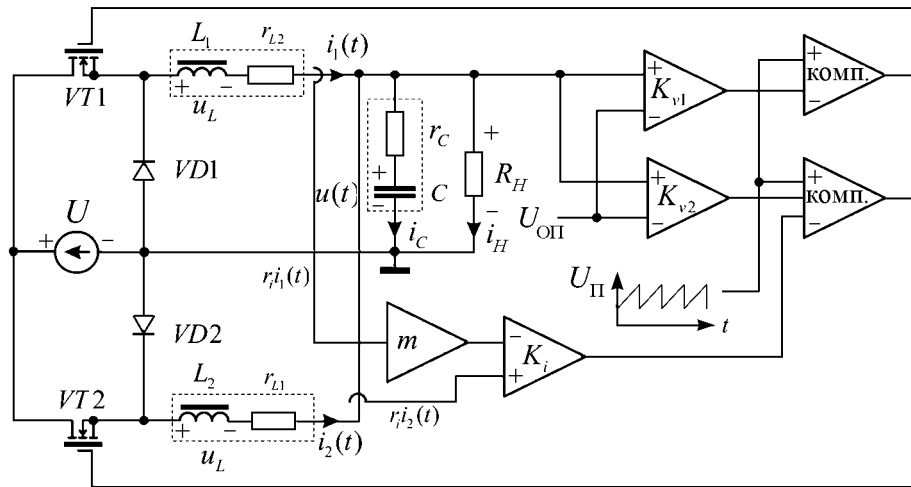


Рис. 1. Функциональная схема составного стабилизатора, состоящего из двух понижающих конверторов, связанных по схеме ведущий–ведомый

Когда транзистор $VT1$ открыт, а транзистор $VT2$ закрыт, силовую часть можно представить в виде, изображенном на рис. 2, б. При этом система с учетом потерь может быть описана матричным уравнением

$$\frac{d}{dt}x(t) = A_2x(t) + B_2, \quad (2)$$

где

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} \\ \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) - \frac{1}{L_1} \left(r_{L1} + r_{T1} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{R_H r_C}{L_1(R_H + r_C)} & \\ \frac{1}{L_2} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) & -\frac{1}{L_2} \left(\frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{1}{L_2} \left(r_{L2} + r_{D2} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(U - U_{T1})}{L_1} & \frac{-U_{D2}}{L_2} \end{bmatrix}^T.$$

Когда транзистор $VT2$ открыт, а транзистор $VT1$ закрыт, эквивалентная схема имеет вид, представленный на рис. 2, в. Тогда система описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}x(t) = A_3x(t) + B_3,$$

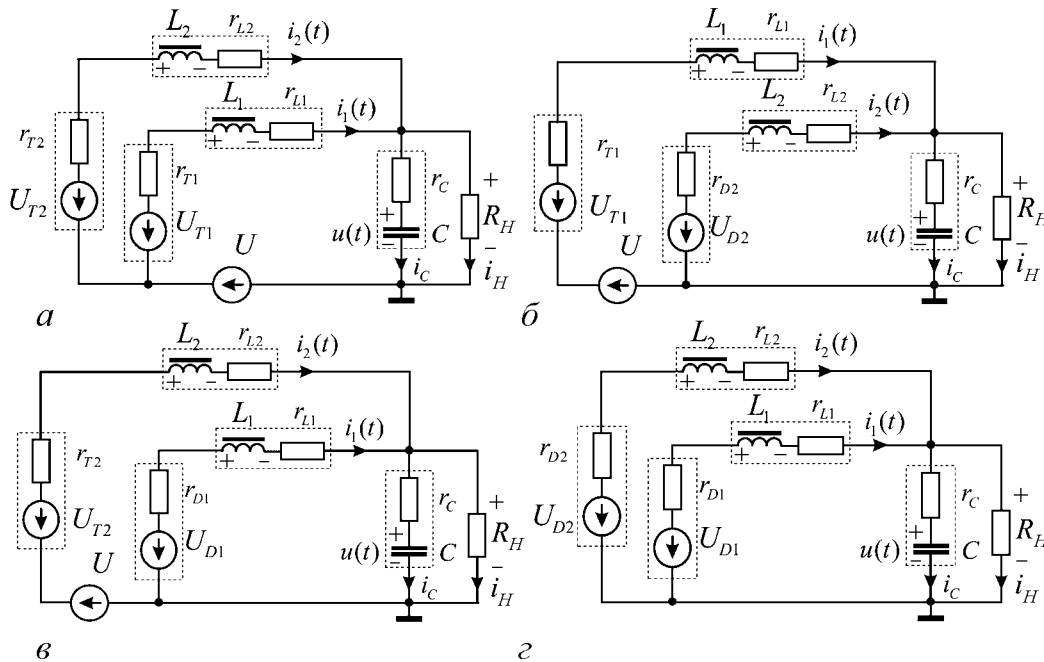


Рис. 2. Эквивалентная схема силовой части составного стабилизатора при открытых силовых ключах $VT1$ и $VT2$ (а), при открытом $VT1$ и закрытом $VT2$ (б), при открытом $VT2$ и закрытом $VT1$ (в) и при закрытых $VT1$ и $VT2$ (г)

где

$$A_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} \\ \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) - \frac{1}{L_1} \left(r_{L_1} + r_{D_1} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{R_H r_C}{L_1(R_H + r_C)} & \\ \frac{1}{L_2} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) & -\frac{1}{L_2} \left(\frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{1}{L_2} \left(r_{L_2} + r_{T_2} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-U_{D_1}}{L_1} & \frac{(U - U_{T_2})}{L_2} \end{bmatrix}^T.$$

Когда оба транзистора закрыты, эквивалентная схема силовой части выглядит так, как показано на рис. 2, з, а система описывается следующим матричным уравнением:

$$\frac{d}{dt}x(t) = A_4x(t) + B_4, \quad (3)$$

где

$$A_4 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} & \frac{R_H}{C(R_H + r_C)} \\ \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) - \frac{1}{L_1} \left(r_{L_1} + r_{D_1} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{R_H r_C}{L_1(R_H + r_C)} & \\ \frac{1}{L_2} \left(\frac{r_C}{R_H + r_C} - 1 \right) & -\frac{1}{L_2} \left(\frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) & -\frac{1}{L_2} \left(r_{L_2} + r_{D_2} + \frac{R_H r_C}{R_H + r_C} \right) \end{bmatrix},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-U_{D_1}}{L_1} & \frac{-U_{D_2}}{L_2} \end{bmatrix}^T.$$

Пилообразное напряжение цепи обратной связи составного стабилизатора описывается следующим выражением:

$$U_{\Pi} = U_{\min} + (U_{\max} - U_{\min}) \frac{t \bmod T}{T}, \quad (4)$$

где U_{\min} и U_{\max} – минимальное и максимальное напряжения компенсации, T – период пилообразного напряжения U_{Π} . Пилообразное напряжение подается на первые входы компараторов, а на вторые входы подаются напряжения сигналов ошибки, описываемые зависимостями

$$U_{\text{комп1}} = U_{\text{см}} - K_{v1}(u(t) - U_{\text{оп}}), \quad (5)$$

$$U_{\text{комп2}} = U_{\text{см}} - K_{v2}(u(t) - U_{\text{оп}}) - K_i(r_{i2} - m r_{i1}), \quad (6)$$

где K_{v1} и K_{v2} – коэффициенты усиления усилителей обратной связи по напряжению, показанных на рис. 1; K_i и m – коэффициенты усиления усилителей обратной связи по току для обоих датчиков тока и дополнительного усилителя для датчика

тока дросселя L_1 , соответственно; $r_i i_1$ и $r_i i_2$ – сигналы датчиков тока дросселей L_1 и L_2 ; $U_{оп}$ – опорное напряжение цепи обратной связи; $U_{см}$ – напряжение смещения цепи обратной связи. Как видно из этих выражений, одним из отличий ведомого стабилизатора от ведущего является то, что на работу одного обратная связь по току обоих дросселей оказывает влияние, а на работу другого нет.

На основании вышеизложенных уравнений и выражений автором была составлена программа, находящая численное решение уравнений состояния (1)–(4) методом Рунге–Кутты 4-го порядка в каждом из состояний, которые переключаются между собой согласно вышеизложенным законам управления (5)–(7). Некоторые результаты данного моделирования приведены ниже.

2. Бифуркационные диаграммы системы связанных источников стабильного напряжения с учетом различных потерь

Автором было проведено исследование влияния основных параметров связанного конвертера [1–2], таких как индуктивность дросселей силовой части схемы, емкость выходного конденсатора, среднее значение входного напряжения и др. на его хаотическую работу. Все основное качественное влияние можно отследить по характерному изменению внешнего вида бифуркационных диаграмм. Для построения бифуркационных диаграмм были использованы параметры, взятые из [1–2]. Они имели следующие значения: $C = 47$ мкФ, $r_{L_1} = 0.05$ Ом, $r_{L_2} = 0.2$ Ом, $r_C = 0.1$ Ом, $T = 400$ мкс, $K_i = 5$, $m = 1$, $R_H = 10$ Ом, $U_{оп} = 24$ В, минимальное напряжение пилы $U_{мин} = 2$ В, максимальное напряжение пилы $U_{мак} = 8$ В, постоянная составляющая входного напряжения $U = 35.85$ В, напряжение смещения $U_{см} = 5$ В. При данных параметрах схемы были получены все представленные в данной статье бифуркационные диаграммы для системы связанных стабилизаторов как зависимость от коэффициентов усиления усилителей обратной связи K_{v1} и K_{v2} . Причем значения обоих коэффициентов менялось одновременно, то есть $K_{v1} = K_{v2}$.

Для исследования влияния индуктивности на устойчивость системы, с точки зрения возникновения хаотичной работы, индуктивность дросселей была сначала понижена до значений $L_1 = 15$ мГн и $L_2 = 30$ мГн, а затем повышена до значений $L_1 = 25$ мГн и $L_2 = 50$ мГн. Бифуркационные диаграммы для пониженных и повышенных индуктивностей для выходного напряжения составного стабилизатора приведены на рис. 3, а для тока первого дросселя на рис. 4.

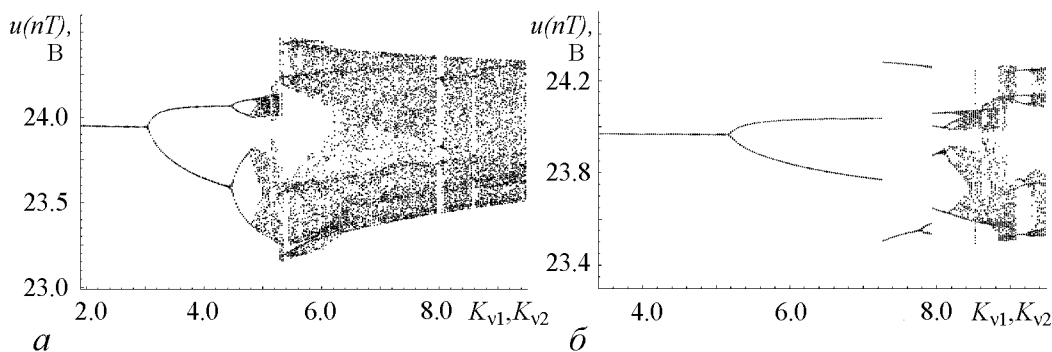


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы для выходного напряжения $u(nT)$ при $C = 47$ мкФ: а – $L_1 = 15$ мГн, $L_2 = 30$ мГн; б – $L_1 = 25$ мГн, $L_2 = 50$ мГн

Было исследовано также влияние емкости на хаотическую работу. Аналогичным образом значение емкости было также сначала занижено до $C = 30$ мкФ, а затем повышено до $C = 60$ мкФ. Бифуркационные диаграммы для $C = 30$ мкФ и $C = 60$ мкФ для выходного напряжения составного стабилизатора приведены на рис. 5, а для тока первого дросселя на рис. 6.

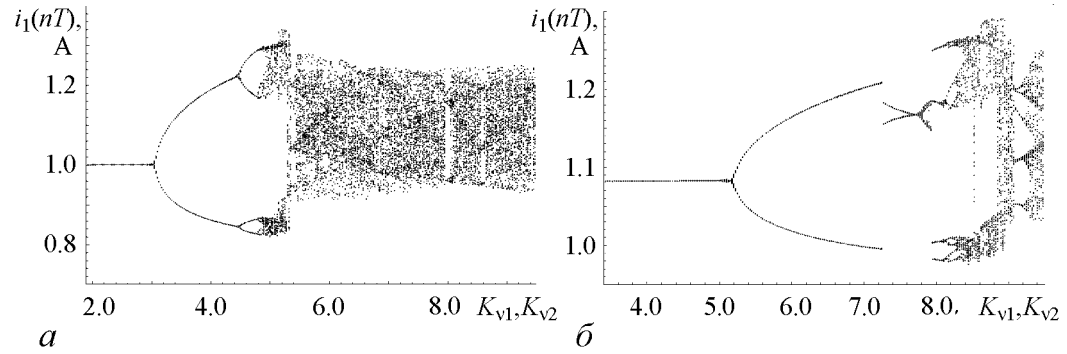


Рис. 4. Бифуркационные диаграммы для тока первого дросселя $i_1(nT)$ при $C = 47$ мкФ: $a - L_1 = 15$ мГн, $L_2 = 30$ мГн; $b - L_1 = 25$ мГн, $L_2 = 50$ мГн

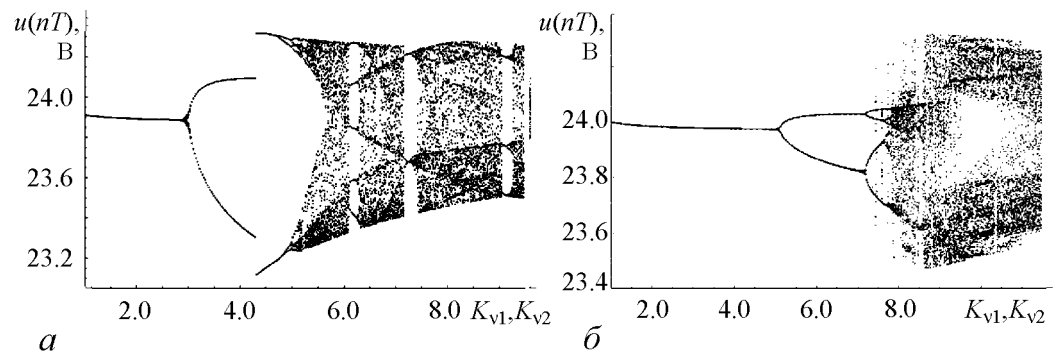


Рис. 5. Бифуркационные диаграммы для выходного напряжения $u(nT)$ при $L_1 = 20$ мГн, $L_2 = 40$ мГн и при C : $a - 30$ мкФ; $b - 60$ мкФ

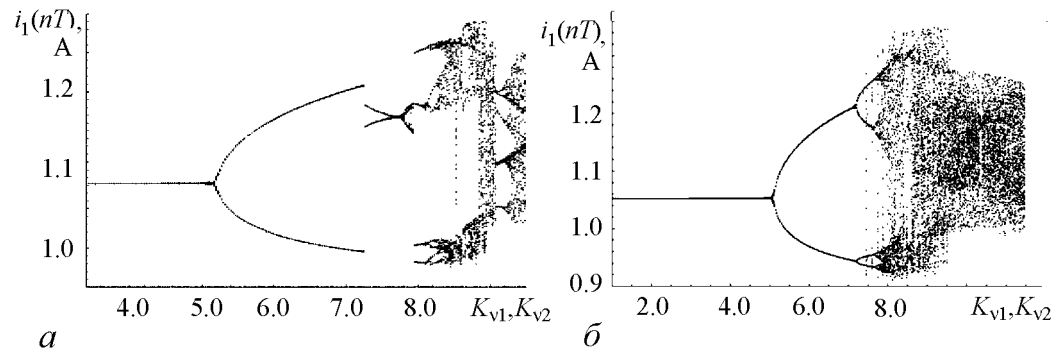


Рис. 6. Бифуркационные диаграммы для тока первого дросселя $i_1(nT)$ при $L_1 = 20$ мГн, $L_2 = 40$ мГн и при C : $a - 30$ мкФ; $b - 60$ мкФ

Как видно из бифуркационных диаграмм (рис. 3–6), переход к хаосу осуществляется в основном через удвоение периода. На некоторых диаграммах (рис. 3, *a*, 4, *a*, 5, *б*, 6, *a*) хорошо видны последовательные переходы через бифуркации периода 2, 4 и 8 к хаосу. Кроме того, на многих бифуркационных диаграммах в зоне хаотической работы видны окна как периода 3 (рис. 3, *a*, 4, *a*, 5, *a*), так и окна периодов, кратных 3 (рис. 3, *б*, 4, *б*, 6, *a*).

Судя по бифуркационным диаграммам рис. 3, можно сделать вывод, что при пропорциональном увеличении значений индуктивностей дросселей L_1 и L_2 со значений $L_1 = 15$ мГн, $L_2 = 30$ мГн до значений $L_1 = 25$ мГн, $L_2 = 50$ мГн граница устойчивой работы до первой бифуркации удвоения для выходного напряжения отодвигается со значений примерно $K_v \approx 3.0$ до $K_v \approx 5.5$. Те же самые выводы следуют для токов первого дросселя из рис. 4. Также из сравнения рис. 4, *a* и 4, *б* видно, что в дросселе с меньшей индуктивностью в хаотическом режиме работы пульсации тока заметно больше по величине.

В результате анализа было установлено, что при понижении емкости со значения $C = 47$ мкФ до значения $C = 30$ мкФ граница устойчивой работы для выходного напряжения сдвигается со значения $K_v \approx 4.2$ до значения $K_v \approx 3.0$. При повышении емкости со значения $C = 47$ мкФ до значения $C = 60$ мкФ граница устойчивой работы для выходного напряжения и токов обоих дросселей сдвигается со значения $K_v \approx 4.2$ до значения $K_v \approx 5.0$.

3. Внешний вид странных аттракторов связанных понижающих конвертеров и их фрактальные размерности Реньи

На основании разработанной автором программы, принцип действия которой и подтверждение достоверности полученных при помощи нее результатов подробно описаны в [4], были найдены различные хаотические аттракторы, а затем измерены их основные и специальные фрактальные размерности. Сама программа была разработана на теоретическом материале, представленном в [5–13]. Следует отметить, что внешний вид аттракторов, типичные формы которых приведены на рис. 7, предполагает наличие сложной функции последования. Лишь аттракторы, находящиеся на поверхности сечения, имеют относительно простые геометрические структуры, что видно из рис. 7, *a*.

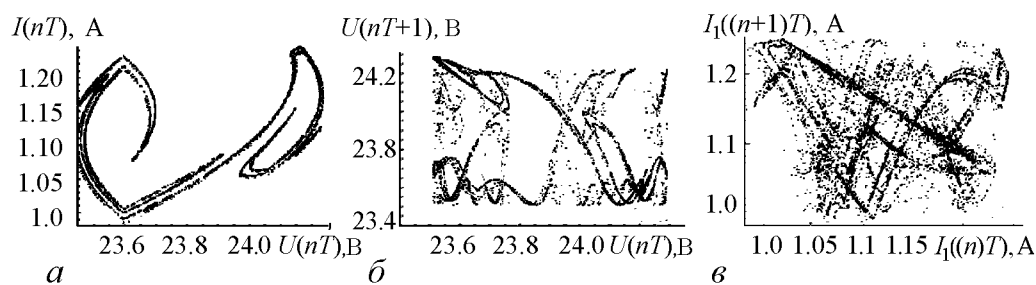


Рис. 7. Внешний вид странных аттракторов для связанных понижающих конвертеров на секущей поверхности (*a*) и сечениях Пуанкаре для выходного напряжения (*б*) и тока первого дросселя (*в*) при $K_v = K_{v1} = K_{v2} = 9.5$

Для определения фрактальных размерностей аттрактора необходимо разбить фазовое пространство, в котором находится аттрактор, на элементарные ячейки, то есть кубы различной размерности. Для обеспечения соответствия размерностей переменных фазового пространства предлагаем избавиться от размерностей вообще, вписав аттракторы в многомерный куб единичного объёма. Тогда все аттракторы, полученные в совершенно различных системах, будут поставлены в одинаковые условия. После нормировки единичный фазовый объём разбивается на $M = N^n$ кубов со стороны ε , где $N \sim 1/\varepsilon$, n – размерность фазового пространства. В рамках данной статьи размерность n бралась равной 2.

С учетом вышеперечисленных условий размерности Реньи будут определяться выражением [6,7]

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left(\sum_{i=0}^{M(\varepsilon)} p_i^q \right)}{\ln(\varepsilon)},$$

из которого видно, что существует целый спектр размерностей для любого действительного числа q , лежащего в пределах $-\infty < q < +\infty$. Выделим некоторые основные размерности спектра, имеющие приоритетную значимость на данный период развития синергетики:

D_0 – размерность Хаусдорфа, определяющая емкость аттрактора;

D_1 – информационная размерность, определяемая энтропией Колмогорова;

D_2 – корреляционная размерность, которая также может быть определена через корреляционный интеграл по методу Грассбергера–Прокачиа (однако в данной статье корреляционный интеграл не брался).

Формулы для основных размерностей после раскрытия неопределенностей в соответствующих пределах будут иметь следующий вид:

$$D_0 = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left(\sum_{i=0}^{M(\varepsilon)} 1 \right)}{\ln(\varepsilon)}, \quad D_1 = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{- \sum_{i=0}^{M(\varepsilon)} p_i \ln(p_i)}{\ln(\varepsilon)}, \quad D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left(\sum_{i=0}^{M(\varepsilon)} p_i^2 \right)}{\ln(\varepsilon)}.$$

Кроме основных, определены две специальные размерности: минимальная $D_{+\infty}$, определяемая из предела $D_{+\infty} = \lim_{q \rightarrow +\infty} D_q$, и максимальная $D_{-\infty}$, определяемая из предела $D_{-\infty} = \lim_{q \rightarrow -\infty} D_q$ [10]. Как показал анализ, для нахождения величин $D_{+\infty}$ и $D_{-\infty}$ с точностью, примерно, до 0.001% достаточно ограничиться значением $|q| = 10000$ [14].

Полученные зависимости основных и специальных фрактальных размерностей от параметра бифуркации представлены на рис. 8. Из рис. 8, *a* и *b* видно, что при параметрах бифуркации $K_v = K_{v1} = K_{v2} = 9.5$ между значениями основных размерностей видны заметные различия, что позволяет предположить мультифрактальную природу соответствующих аттракторов, поскольку, если функция D_q как-то меняется с q , то рассматриваемое множество точек является мультифракталом [12]. Следовательно, некоторые аттракторы на сечении Пуанкаре для напряжения выхода

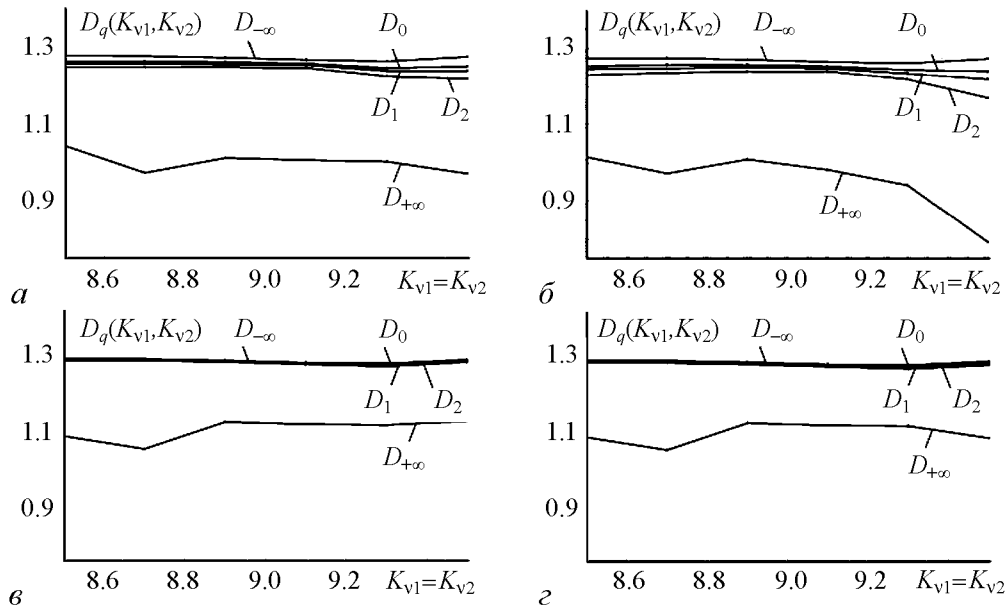


Рис. 8. Зависимости основных и специальных размерностей от параметра бифуркации для аттракторов находящихся: *a* – на поверхности сечения; *б* – на сечении Пуанкаре для напряжения выхода; *в* и *г* – на сечении Пуанкаре для токов первого и второго дросселей, соответственно

и на секущей поверхности имеют явную мультифрактальную природу. А вот аттракторы на сечении Пуанкаре для токов первого и второго дросселя (рис. 8, *в*, *г*), следуя данному определению, не имеют мультифрактальных свойств.

Заключение

Из анализа полученных в работе бифуркационных диаграмм можно сделать следующие качественные выводы:

- увеличение емкости выходного конденсатора приводит к увеличению устойчивости стабилизатора с точки зрения возникновения бифуркаций;
- увеличение индуктивности одного из дросселей приводит к уменьшению уровня пульсаций в нем;
- данные результаты можно использовать как при синтезе подобных систем с целью увеличения их устойчивости, так и при их фрактальном анализе.

Из анализа зависимостей основных и специальных размерностей от параметра бифуркации следует:

- только выходное напряжение полностью отражает нелинейную динамику системы, поскольку только сечение Пуанкаре для выходного напряжения отражает мультифрактальную природу секущей поверхности;
- только выходное напряжение можно использовать для фрактального анализа нелинейной динамики исследуемой системы связанных стабилизаторов;
- только аттрактор, восстановленный из выходного напряжения по методу за-

держек, будет обладать, согласно теореме Такенса [7], свойствами аттрактора всей системы;

• этот теоретически полезный вывод можно использовать как при фрактальном анализе подобных систем, так и при практическом выяснении причин возникновения их хаотического поведения.

Библиографический список

1. *Iu H.H.C. and Tse C.K.* Bifurcation behaviour of parallel-connected buck converters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. February 2001. Vol. 48, № 2. P. 233.
2. *Iu H.H.C. and Tse C.K.* Effects of interleaving on bifurcation behaviour in parallel-connected buck converters // Journal of Circuits, Systems and Computers. June 2004. Vol. 13, № 3. P. 495.
3. *Iu H.H.C. and Tse C.K.* Instability and bifurcation in parallel-connected buck converters under a master-slave current sharing scheme // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Galway Ireland. June 2000. P. 708.
4. *Антипов О.И., Неганов В.А.* Исследование динамического хаоса в импульсном стабилизаторе напряжения инвертирующего типа с учетом влияния активных потерь с помощью мер фрактального исчисления // Нелинейный мир. Москва, 2008. Т. 6, № 7. С. 364.
5. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
6. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного ряда. Ижевск: НИЦ«Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.
7. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос (курс лекций). М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. 296 с.
8. *Федер Е.* Фракталы / Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
9. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
10. *Мун Ф.* Хаотические колебания: Вводный курс для научных сотрудников и аспирантов / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 312 с.
11. *Шустер Г.* Детерминированный хаос: Введение / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 312 с.
12. *Божоккин С.В., Паришин Д.А.* Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 128 с.
13. *Табор М.* Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике / Пер.с англ., науч. ред. В.А. Журавлев. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 320 с.
14. *Антипов О.И., Неганов В.А.* Исследование динамического хаоса в импульсном стабилизаторе напряжения инвертирующего типа с учетом влияния активных потерь с помощью мер фрактального исчисления // Нелинейный мир. Москва, 2008. Т. 6, № 7. С. 364.

*Поволжский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики, Самара*

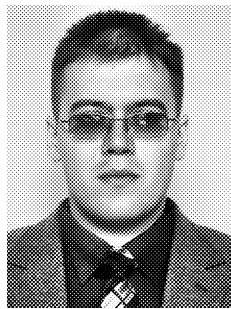
*Поступила в редакцию 15.06.2009
После доработки 4.09.2009*

ANALYSIS OF STOCHASTIC WORK OF THE COMPOSITE VOLTAGE STABILIZER CONSISTING OF TWO BUCK CONVERTERS CONNECTED AS MASTER-SLAVE BY FRACTAL MEASURES OF DETERMINISTIC CHAOS

O.I. Antipov

Stochastic operation of the parallel-connected buck convertors is considered. For qualitative analysis of the system the bifurcation diagrams are plotted. Quantitative analysis of chaotic regimes was realized by computing of main and special fractal dimensions.

Keywords: Chaos, strange attractors, fractional dimensionality.



Антипов Олег Игоревич – родился в Куйбышеве (1978), окончил Самарский государственный технический университет (2000). В этом же году поступил в аспирантуру Поволжской государственной академии телекоммуникации и информатики на кафедру основ конструирования и технологии радиотехнических систем и параллельно начал преподавательскую деятельность ассистентом этой же кафедры. Закончил аспирантуру (2003) и перевелся на должность старшего преподавателя кафедры. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 на тему «Исследование динамических характеристик и детерминированного хаоса импульсных стабилизаторов напряжения» (2005). На данный момент является старшим научным сотрудником кафедры. Автор монографии «Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах» (в соавторстве с Негановым В.А. и Потаповым А.А.), имеет более 45 научных работ.

443010 Самара, ул. Л. Толстого, 23

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
E-mail: oleg1307@mail.ru