

СТРУКТУРА ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В.Я.Жуйков, докт.техн.наук, **А.А.Матийко**
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
 пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: andrew.matiyko@gmail.com

Рассматривается структура хаотических колебаний, возникающих в преобразователе постоянного напряжения. Исследовано влияние шага решения трансцендентного и дифференциальных уравнений на результаты моделирования. Рассмотрено явление кластера хаотических колебаний при смене варианта фиксации интервалов между точками переключения ключа. Библиография: 5, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: хаотические процессы, бифуркация, преобразователь.

Введение. Изучение структуры хаотических процессов, возникающих в преобразователях постоянного напряжения при изменении величины коэффициента усиления канала обратной связи [1, 2], можно проводить при трех различных вариантах фиксации интервалов длительности включенного состояния ключа, начало и окончание которых определяется моментами переключения ключа и/или началом и окончанием периода развертывающего напряжения. При первом варианте интервалы фиксируются от момента начала периода действия развертывающего напряжения до момента переключения ключа; при втором – от момента переключения ключа до момента окончания действия развертывающего напряжения; при третьем – интервалы фиксируются между моментами включения и выключения ключа. Кластеры хаотических колебаний выявляются при всех указанных вариантах, но при построении бифуркационной диаграммы и при использовании третьего варианта хаотические процессы, составляющие кластер, представляются на диаграмме отдельными областями. Это упрощает рассмотрение структуры таких процессов, что составляет цель работы.

Модель преобразователя. Процессы, протекающие в силовой части понижающего преобразователя с ШИМ-2 развертывающего типа, описываются системой уравнений

$$\begin{cases} (di_L / dt) = -(sr / L)i_L - u_C / L + sE / L, \\ du_C / dt = i_L / C - u_C / RC, \end{cases} \quad (1)$$

а процессы канала обратной связи –

$$\begin{cases} U_p = k(U_r - k_d U); \\ U_k = -U_g + U_p; \\ s = s(U_{zw}), \end{cases} \quad (2)$$

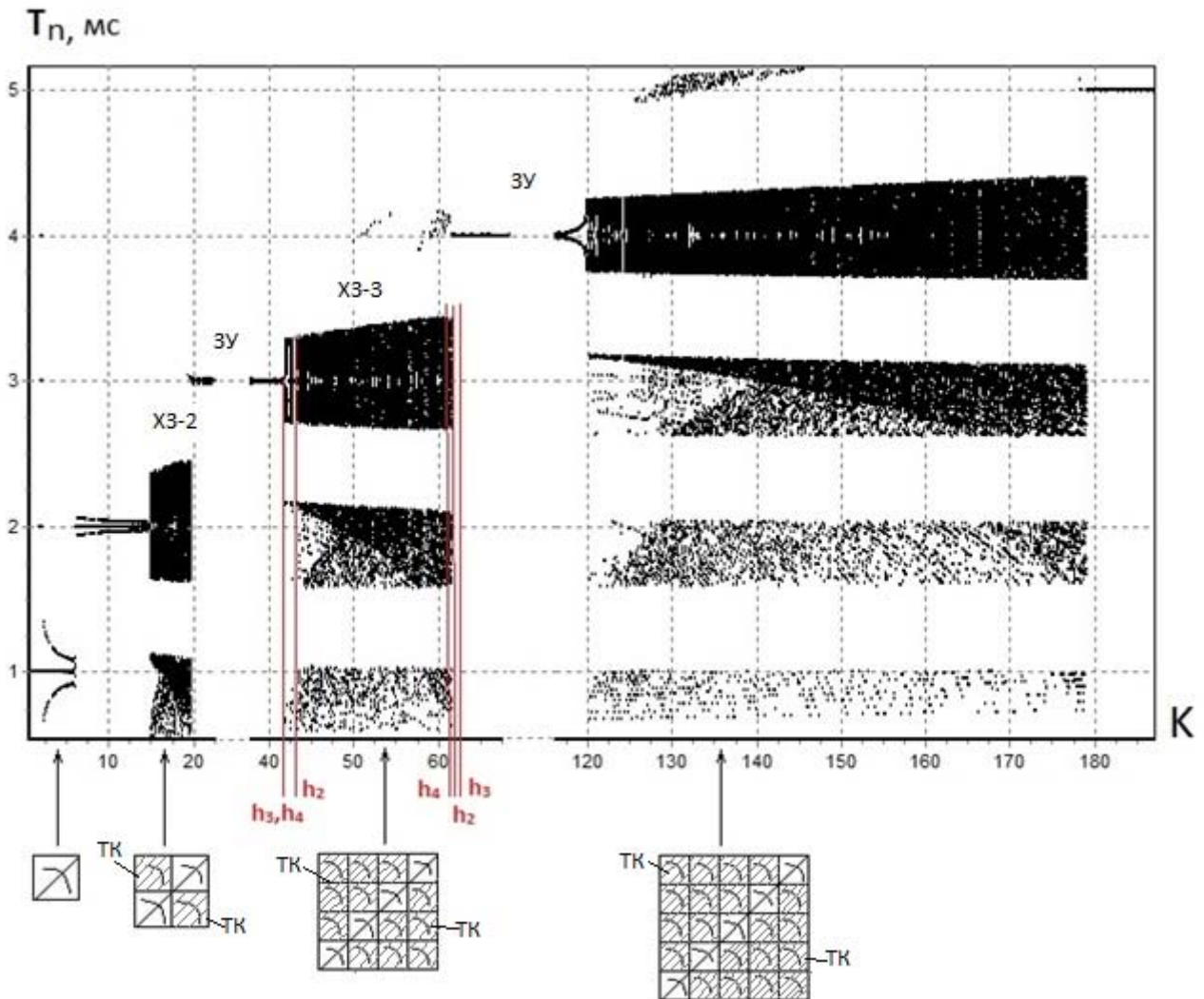
где E – напряжение источника питания; L, C, R, r – линейные индуктивность, емкость, сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление источника питания; u_C, i_L – напряжение на конденсаторе и ток в индуктивности соответственно; s – функция переключения, k_d – коэффициент передачи делителя, U_r – напряжение опорного элемента.

В соответствии с алгоритмом работы системы управления напряжение U_p на выходе усилителя сигнала ошибки сравнивается на компараторе с напряжением U_g ($U_g(t) = U_{ag}(t-nT)/T$, $n=1,2,3\dots$; $0 \leq t \leq T$; U_{ag} – амплитудное значение напряжения генератора пилообразного развертывающего напряжения). На выходе компаратора формируются прямоугольные импульсы, которые соответствуют интервалам замкнутого (функция переключения $s=1$ при $U_k > 0$) и разомкнутого ($s=0$ при $U_k \leq 0$) состояния силового ключа стабилизатора [3,4].

Моделирование хаотических процессов. Структура хаотических колебаний зависит от параметров системы, а форма их представления – от выбора варианта фиксации интервалов между точками переключения ключа. Для параметров системы $R=100$ Ом; $r=0,1$ Ом, $L=0,1$ Гн, $C=10^{-6}$ Ф, $E=1000$ В, $U_r=10$ В, $U_M=10$ В, $T=0,001$ с, $k_d=0,01$ значение корней p_1 и p_2 характеристического многочлена матрицы коэффициентов действительны (при $s=0$: $p_1=-8873,0$; $p_2=-1127,0$, а при $s=1$: $p_1=-8872,8$; $p_2=-1128,2$). Для диапазона изменения коэффициента усиления $k=1 \div 200$ с шагом $\Delta k=0,01$ построена бифуркационная диаграмма зависимости времени между переключениями, на которой отображено чередование хаотических колебаний с локальными зонами устойчивости (ЗУ), в соответствии с третьим вариантом фиксации длительности интервалов включенного состояния ключа s .

На рисунке показаны хаотические зоны ХЗ-2, ХЗ-3, которые чередуются с зонами устойчивости (ЗУ) с периодом повторения 3Т, 4Т, 5Т. Кластеры хаотических колебаний при выбранном варианте фиксации интервалов составляют отдельные области хаотических процессов с соответствующими трансферными кривыми

(ТК) [5]. Зависимость количества однородных хаотических процессов от изменения величины коэффициента усиления не является линейной. Так, при переходе из второй хаотической зоны (ХЗ-2) в третью (ХЗ-3) количество однородных хаотических процессов выросло в 2 раза и составляет 4, в то время как при иных параметрах [5] для кластера, следующего за ХЗ-2, количество однородных хаотических процессов равняется 3. Количество трансферных кривых соответствующего отображения также изменилось. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления (более 400) наблюдалось уменьшение количества однородных хаотических процессов с 8 до 4 с уменьшением количества трансферных кривых, что также указывает на существование нелинейной зависимости числа однородных хаотических процессов, содержащихся в кластере при изменении величины коэффициента усиления цепи обратной связи.



Следует обратить внимание на то, что результаты моделирования зависят от точности расчетов, которая определяется тремя факторами: 1) значением машинного нуля, 2) значением величины шага решения системы дифференциальных уравнений, 3) значением величины шага решения трансцендентного уравнения. В данном случае величина значения машинного нуля составляет 10^{-16} , а решение системы дифференциальных уравнений и трансцендентного уравнения проводится с одинаковым шагом. При этом влияние величины шага проявляется следующим образом: 1) при шаге $h_1=10^{-5}$ отсутствует чередование хаотических зон с зонами локальной устойчивости; 2) при шаге $h_2=10^{-6}$ выделяется начало и конец хаотической зоны; 3) при $h_3=10^{-7}$ и $h_4=10^{-8}$ третья хаотическая зона начинается при одинаковом коэффициенте усиления $k=41,7$; 4) окончание третьей хаотической зоны при разных значениях шага h_2, h_3 и h_4 отличается. На рисунке начало и окончание ХЗ-3 отмечено прямыми линиями с обозначением соответствующего шага h_2, h_3, h_4 . Также стоит отметить, что для всех однородных составляющих хаотических процессов в кластере начало и окончание соответствует одинаковым коэффициентам усиления.

Нелинейная зависимость изменения последовательности чисел, образуемой целыми периодами развертывающего напряжения, вкладываемыми между переключениями, сохраняется. Например, для третьей хаотической зоны ХЗ-3 при значении коэффициента усиления $k=48$ формируется последовательность целых чисел,

соответствующих количеству периодов развертывающего напряжения между переключениями, приведенными в таблице в строке 2, в которой в первой строке указаны номера переключений.

№ перекл.	1	2	3	4	5	6	7	...	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Кол. Период.	3	2	2	2	2	2	2	...	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1
Число повт.	1	16										2		2		4			

В третьей строке таблицы указано число повторений количества периодов между переключениями, что формирует вторую последовательность, которая, вероятно, также должна иметь хаотический характер.

Выводы. Изменение шага расчета дифференциальных и трансцендентных уравнений приводят к изменению точки начала и окончания кластера хаотических процессов, что указывает на отличие дискретной модели от аналоговой и требует дальнейших уточнений значений этих точек и выбора шага решения уравнений.

Использование различных вариантов фиксации интервалов между точками переключений влияет на форму представления результатов, не изменяя характеристик и вида кластера хаотических процессов. Применение третьего варианта фиксации позволяет выделить области существования однородных хаотических процессов в кластере. При этом изменение количества однородных хаотических процессов в кластерах при изменении коэффициента усиления носит нелинейный характер.

1. Жуиков В.Я., Леонов А.О. Хаотические процессы в электротехнических системах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1991. – №1. – С. 121–127.

2. Стжелецкий Р., Коротеев И.Е., Жуиков В.Я. Хаотические процессы в системах силовой электроники. – Киев: Аверс, 2001. – 197 с.

3. Брушко В.В., Жуиков В.Я. Хаотизация динамики стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Технічна електродинаміка. Темат. випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 1999. – Ч. 3. – С. 115–118.

4. Береже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности. – М.: Мир, 1991. – 368 с.

5. Жуиков В.Я., Коліченко М.Е. Кластер хаотических колебаний // Технічна електродинаміка. Темат. випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2013. – Ч. 3. – С. 29–33.

СТРУКТУРА ХАОТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ

В.Я.Жуиков, докт.техн.наук, А.А.Матійко

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.**

E-mail: andrew.mativko@gmail.com

Розглядається структура хаотичних коливань, що виникають у перетворювачі постійної напруги. Досліджено вплив кроку рішення трансцендентного і диференціальних рівнянь на результати моделювання. Розглянуто явище кластера хаотичних коливань при зміні варіанту фіксації інтервалів між точками перемикання ключа. Бібл. 5, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: хаотичні процеси, біфуркація, перетворювач.

THE STRUCTURE OF CHAOTIC PROCESSES IN VOLTAGE CONVERTER

V.Zhuikov, A.Matiiko

**National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.**

E-mail: andrew.mativko@gmail.com

The structure of the chaotic oscillations in the DC converter is considered in the article. The influence of the transcendental and differential equations solution step on the simulation results is studied. The phenomenon of chaotic oscillations cluster when changing the interval fixing variant between key switching points is considered.

References 5, table 1, figure 1.

Keywords: chaotic processes, bifurcation, converter.

1. Zhuikov V.Ya., Leonov A.O. Chaotic processes in electrical systems // Izvestiia AN SSSR. Energetika i transport. – 1991. – № 1. – Pp. 121–127. (Rus)

2. Stzheletskiy R., Koroteev I.E., Zhuikov V.Ya. Chaotic processes in power electronic systems. – Kyiv: Avers, 2001. – 197 p. (Rus)

3. Brushko V.V., Zhuikov V.Ya. Randomization voltage regulator dynamics with PWM regulation // Tekhnichna elektrodynamika. – Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoeffektyvnist". – 1999. – Vol. 3. – Pp. 115–118. (Rus)

4. Berzhe P., Pomo I., Vidal K. Order in Chaos. – Moskva: Mir, 1991. – 367 p. (Rus)

5. Zhuikov V.Ya., Kolichenko M.E. Cluster of chaotic oscillations // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoeffektyvnist". – 2013. – Vol. 3. – Pp. 29–33. (Rus)

Надійшла 24.02.2014