

# Управление нелинейной динамикой непосредственного повышающего преобразователя напряжения на основе линеаризации отображения Пуанкаре

Андрянов Алексей Иванович

*Брянский государственный технический университет (Брянск), Россия*  
e-mail: mail@ahaos.ru

УДК 51-74:621

Управление нелинейной динамикой непосредственного повышающего преобразователя на основе многопараметрического метода линеаризации отображения Пуанкаре

А. И. Андрянов

Брянский государственный технический университет

Аннотация – Исследуется работа алгоритма многопараметрического управления нелинейной динамикой на основе линеаризации отображения Пуанкаре в областях мультистабильности при управлении нелинейной динамикой непосредственного повышающего преобразователя, обладающего нелинейной регулировочной характеристикой. Представлены результаты математического моделирования системы автоматического управления на основе непосредственного повышающего преобразователя в виде карт динамических режимов и диаграмм размаха колебаний выходного напряжения, подтверждающие эффективность работы алгоритма управления.

Полученные результаты получены впервые и могут быть использованы при проектировании систем электропитания на основе непосредственного повышающего преобразователя напряжения.

Ключевые слова – система автоматического управления; нелинейная динамика; бифуркация; динамический режим; преобразователь постоянного напряжения; отображение Пуанкаре.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Импульсные преобразователи напряжения в настоящее время достаточно распространены, поскольку обеспечивают высокий коэффициент полезного действия и обладают малыми массогабаритными показателями [1]. Они представляют собой замкнутые системы автоматического управления (САУ) на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), склонные к возникновению в результате бифуркаций сложных колебаний (периодических, квазипериодических и хаотических), которые зачастую имеют большую амплитуду, что опасно для компонентов силовой части преобразователя [2]. В данном случае важно понятие так называемого  $m$ -цикла. Под  $m$ -циклом понимается динамический режим, при котором период колебаний выходного напряжения в  $m$  раз больше чем период ШИМ. Показатель  $m$  в [3] назван кратностью периода.

Основной задачей на этапе проектирования таких преобразователей является устранение опасных колебаний и обеспечение проектного динамического режима, при котором частота колебаний совпадает с несущей частотой ШИМ, при этом амплитуда колебаний достаточно мала (1-цикл) [2].

Наиболее перспективным для решения указанной задачи является структурный синтез, при котором выбирается такая структура системы управления и алгоритм ее работы, при которой даже в областях параметров со сложной динамикой обеспечивается желаемый динамический режим.

По управлению нелинейной динамикой дискретных систем или систем, сводимых к ним, существует достаточно много работ [4–8]. Данные работы в основном посвящены стабилизации неустойчивых динамических режимов и не адаптированы для управления нелинейной динамикой в области мультистабильности. Под областью мультистабильности понимается область, в которой существует несколько устойчивых режимов один из которых желаемый 1-цикл. В данном случае требуется сформировать такое управляющее воздействие, при котором система, работающая в одном из нежелательных режимов, переходит в желаемый режим.

В работе [9] автором рассматривался многопараметрический подход к управлению нелинейной динамикой в областях мультистабильности на основе метода линеаризации отображения Пуанкаре, позволяющего увеличить площадь области притяжения проектного режима в областях мультистабильности. Однако за рамками статьи осталась оценка возможности применения разработанного метода в преобразователях с нелинейной регулировочной характеристикой к которым относится непосредственный повышающий преобразователь. Анализ работ по управлению нелинейной динамикой, например, [5], [6], [8], показал, что эффективность различных методов управления нелинейной динамикой непредсказуема и зависит как от типа преобразователя, так и от набора параметров системы, поэтому всестороннее исследование нелинейной динамики САУ с различными типами импульсных преобразователей напряжения является актуальной.

Основной задачей данной работы является оценка эффективности многопараметрического алгоритма управления нелинейной динамикой в областях мультистабильности на основе линеаризации отображения Пуанкаре для импульсных САУ на основе непосредственного повышающего преобразователя напряжения.

## II. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ В ОБЛАСТЯХ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ОТОБРАЖЕНИЯ ПУАНКАРЕ

На рис. 1 представлена функциональная схема замкнутой САУ на основе непосредственного повышающего преобразователя, где приняты обозначения:  $R$  – активное сопротивление дросселя,  $L$  – индуктивность дросселя,  $C$  – емкость конденсатора,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $E_0$  – напряжение источника питания,  $U_z$  – напряжения задания,  $U_i$  – импульсы управления силовым ключом,  $U_{оп}$  – напряжение ошибки,  $U_u$  – напряжение управления,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $U_p$  – развертывающее напряжение,  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора и его приращение соответственно,  $\beta$ ,  $\Delta\beta$  – масштабный коэффициент цепи обратной связи и его приращение соответственно.

Рассматриваемая система представляет собой классическую замкнутую систему автоматического управления с обратной связью по выходному напряжению. Кроме того, в ней присутствует подсистема управления нелинейной динамикой, состоящая из блоков: «Датчик тока нагрузки», «Датчик тока дросселя», «Вычислитель возмущения параметров», «Датчик входного напряжения». Вычислитель возмущения параметров реализует предлагаемый алгоритм.

Математическая модель рассматриваемой системы с учетом режима прерывистых токов дросселя достаточно широко известна и рассмотрена, например, в [9]. Она представляет собой кусочно-гладкую модель, в которой каждый участок гладкости соответствует определенной топологии силовой части и описывается системой

линейных дифференциальных уравнений.

Рис. 1. Функциональная схема замкнутой системы автоматического управления с непосредственным повышающим преобразователем постоянного напряжения с функцией управлением нелинейной динамикой

Рассматриваемая система может быть отнесена к дискретной САУ с периодом дискретизации  $a$ . Указанные системы удобно описывать в форме так называемого стробоскопического отображения, которое связывает переменные состояния в начале определенного тактового интервала с переменными состояниями в конце тактового интервала [2].

Стробоскопическое отображение для  $k$ -го тактового интервала имеет вид [9]

(1)

$A_i$  – матрица постоянных коэффициентов на  $i$ -том участке,  $B_i$  – вектор вынуждающих воздействий на  $i$ -том участке [9],  $X_k$  – вектор переменных состояния в конце тактового интервала с номером  $k$ ,  $t_{k1}$  – моменты коммутации в относительном времени,  $t_{k1}$  – момент выключения силового ключа на  $p$ -м тактовом интервале в абсолютном времени;  $t_{k2}$  – момент спада тока дросселя до нуля на  $p$ -м тактовом интервале в абсолютном времени. Принцип работы рассматриваемого преобразователя подробно описан в [1].

При работе в областях мультистабильности при попадании системы возможно попадание системы в нежелательный динамический режим. В этом случае необходимо сформировать такое управляющее воздействие в виде возмущения вектора параметров системы  $P$ , возвращающее систему в проектный режим (1-цикл). В данном случае основной проблемой является расчет матрицы обратных связей  $K$ , на основе которой вычисляется требуемое возмущение параметров.

Отображение (1) в общем виде может быть представлено как

(2)

где  $P$  – вектор параметров системы, от которого в (1) зависят  $z_{k1}$  и  $z_{k2}$  на каждом тактовом интервале.

Предположим, что в системе одновременно устойчивы 1-цикл (точка  $X^*$ ) и 3-цикл (точки  $X_i(3)$ , где  $i=1, 2, 3$ ) (рис. 2).

Рис. 2. К пояснению перехода от 3-цикла к проектному 1-циклу в области мультистабильности

При этом, в начале  $k$ -й итерации отображения система находится в точке  $X_{p-1}$ , т.е. в некоторой удаленности от требуемой точки  $X^*$ . Необходимо сформировать такое возмущение вектора параметров  $U_{k-1}$  при котором за один или несколько тактовых интервалов система переместиться в точку  $X^*$ , находящуюся в малой окрестности требуемой неподвижной точки  $X^*$ .

Для расчета корректирующих воздействий в данном случае также используется линеаризация отображения Пуанкаре, при этом линеаризация, в отличие классического МЛОП, производится в окрестности текущей точки стробоскопического отображения  $X_{p-1}$ , где  $sl$  – отклонение от точки  $X_{p-1}$  в процентах, а также окрестности точки в пространстве параметров  $P^*$ .

Линеаризованное отображение имеет вид

(3)

где  $M$  – матрица коэффициентов линеаризованного отображения,  $C$  – производная функции отображения по вектору возмущаемых параметров;  $U$  – требуемое возмущение параметра. Стоит заметить, что размер вектора  $U$  равен размеру вектора переменных состояния  $X$ .

Матрица  $M$  и матрица  $C$  в (3) определяются по выражениям

$$; \quad (4)$$

Для рассматриваемой ситуации, а (см. рис. 3).

Для линейной системы (3) выбирается стабилизирующее управление  $U_{k-1}$  в виде линейной обратной связи по состоянию

$$. \quad (5)$$

С учетом этого из (3) получаем выражение

При управлении динамикой в области мультистабильности необходимо сформировать такое управляющее воздействие, при котором система за один или несколько тактовых интервалов переместится в точку вместо точки, при этом, где – точка в которую отображается. На рис. 3 отмечены модули векторов. Как видно из рисунка, точка лежит ближе к точке устойчивого 1-цикла  $X^*$ , чем точка  $X_k$  нескорректированной системы.

На данном этапе определим критерии выбора точки на каждом  $k$ -м интервале отображения. Указанная точка рассчитывается по выражению

$$, \quad (6)$$

где  $sk$  – степень коррекции, принадлежащая интервалу от 0% до 100%. При практической реализации метода нужно выбирать значение этого коэффициента вблизи нуля, поскольку при больших значениях велика будет величина коррекции, что может привести к ошибкам при использовании линеаризованного отображения Пуанкаре, которое справедливо лишь в малой окрестности точки.

С учетом (6) находим

$$. \quad (7)$$

Степень коррекции приращения на  $k$ -й итерации отображения находится как

Считаем, что

$$(8)$$

Кроме того,

$$, \quad (9)$$

где  $\Delta u_{ki}$  –  $i$ -я компонента вектора  $\Delta Y_k$ ;  $u_{k-1,i}$  –  $i$ -я компонента вектора  $Y_{k-1}$ .

Матрицу коэффициентов обратных связей  $K$  на основании (8) можно рассчитать по выражению

Требуемое возмущение вектора параметров  $U_{k-1}$  рассчитывается по выражению (5).

Таким образом, возмущаемые параметры на  $k$ -такте рассчитываются как

где вектор вида  $P_{k-1}$  – вектор возмущаемых параметров в конце  $k-1$ -го тактового интервала.

При реализации рассмотренного алгоритма необходимо учитывать следующее:

– алгоритм коррекции задействуется только в том случае, если текущая точка отображения (1) находится достаточно далеко от заданной: .

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ НА ОСНОВЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ЛИНЕАРИЗАЦИИ ОТОБРАЖЕНИЯ ПУАНКАРЕ

Работоспособность алгоритма многопараметрического управления нелинейной динамикой непосредственного повышающего преобразователя постоянного напряжения в областях мультистабильности проверялась с использованием математиче-

ского моделирования.

В данном случае исследовалась система со следующими параметрами:  $L=2$  мГн;  $C=1$  мкФ;  $R=1$  Ом;  $R_n=100$  Ом;  $\alpha=2$ ;  $\beta=0,005$ ; амплитуда развращающего напряжения  $U_{pm}=10$  В;  $a=0,0001$  с. Параметры алгоритма многопараметрического управления нелинейной динамикой:  $sk=10$  %;  $sl=2$  %;  $\Delta r_{max}=50$  %;  $szm=0,01$  %. Как видно из рис. 1, для возмущения были выбраны следующие параметры: коэффициент усиления пропорционального регулятора  $\alpha$  и длительность тактового интервала  $a$ .

Результаты исследований представлены в виде так называемой карты динамических режимов, на которых представлены области существования различных режимов в пространстве двух параметров: напряжения задания  $U_z$  и входного напряжения  $E_0$ . На карте символами  $\Pi_{i,j}$  будут отмечены области существования различных динамических режимов ( $i$  –  $m$ -цикл, характерный для данной области,  $j$  – номер области на карте динамических режимов). В частности, область  $\Pi_{1,1}$  представляет собой первую область существования основного (проектного) режима с частотой  $f_{kv}$  (1-цикл). Области  $\Pi_{X,j}$  – соответствуют недетерминированным режимам функционирования преобразователя ( $m \rightarrow \infty$ ). Карта сопровождается соответствующей ей диаграмме размаха колебаний  $\Delta U$ .

Карта динамических режимов непосредственного преобразователя постоянного напряжения представлена на рис. 3, а. Как видно из рисунка, практически на всем диапазоне напряжения задания в системе наблюдаются области мультистабильности.

- а)
- б)
- в)
- г)

Рис. 3. Результаты анализа нелинейной динамики непосредственного повышающего преобразователя: а) карта динамических режимов без использования МЛОП; б) диаграмма относительного размаха колебаний без использования МЛОП; в) карта динамических режимов с использованием МЛОП; г) диаграмма относительного размаха колебаний с использованием МЛОП

В частности, в области  $\Pi_{4,1}$  одновременно существует 4-цикл (частота колебания в четыре раза меньше чем несущая частота ШИМ) и проектный 1-цикл или область хаотических колебаний. На рис. 3, б представлена диаграмма относительного размаха колебаний, соответствующая рис. 3, а. Как видно из рисунка, нежелательным режимам свойственна большая амплитуда колебаний выходного напряжения.

На рис. 3, в и 3, г представлена карта динамических режимов и диаграмма относительного размаха колебаний соответственно при использовании алгоритма многопараметрического управления нелинейной динамикой. Из рис. 3, в видно, что области  $\Pi_{4,1}$ ,  $\Pi_{X,1}$ , представленные на рис. 3, а исчезли и на карте присутствует только желаемый 1-цикл. Как видно из рис. 3, г размах колебаний выходного напряжения во всей области параметров существенно уменьшился, по сравнению со случаем, когда управление нелинейной динамикой не производится.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование нелинейной динамики замкнутой системы автоматического управления на основе непосредственного повышающего преобразователя с функцией управления нелинейной динамикой на основе многопарамет-

рического метода линеаризации отображения Пуанкаре. Проведенный анализ показал эффективность указанного метода. В частности, его применение полностью устранило области мультистабильности в выбранных диапазонах параметров системы, при этом устойчивым остался желаемый 1-цикл.

Полученные результаты подтверждают возможность применения указанного метода для управления нелинейной динамикой преобразователей напряжения рассматриваемого класса с использованием микропроцессорных систем управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

V.S. Vaushev, Zh.T. Zhusubaliev “About the nondeterministic modes of a voltage stabilizer with pulse-width regulation” *Elektrichestvo*, № 8, pp. 47–53, 1992.

Кобзев, А.В. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, А.И. Андрянов, С.Г. Михальченко – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 224 с.

Ott, E Controlling Chaos / E. Ott, C. Grebogi, G. Yorke // *Phys. Rev. Lett.* – 1990. – Vol. 64. – № 11. – P. 1796–1799.

Poddar, G. Control of chaos in DC-DC converter / G. Poddar, K. Chakrabarty, S. Banerjee // *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* – 1998. – Vol. 45. – № 6. – P. 672–676.

Poddar, G. Experimental Control of Chaotic Behavior of Buck Converter / G. Poddar, K. Chakrabarty, S. Banerjee // *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* – 1995. – Vol. 42. – № 8. – P. 502–504.

Pyragas, K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback / K. Pyragas // *Phys. Rev. Lett. A.* – 1992. – Vol. 170. – № 6. – P. 421–428.

Battle C. Stabilization of periodic orbits of the buck converter by time-delayed feedback / C. Battle, E. Fossas, G. Olivar // *International Journal of Circuit Theory and Applications.* – 1999. – Vol. 27, № 3. – P. 617–631.

Андрянов А.И. Алгоритм многопараметрического управления нелинейной динамикой импульсных преобразователей на основе линеаризации отображения Пуанкаре / А.И. Андрянов, И.Ю. Бутарев // *Известия вузов. Электроника*, №6 (110), 2014. – С. 51-59.