

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, α , $\Delta\alpha$ – коэффициент усиления пропорционального регулятора и его приращение соответственно, β , $\Delta\beta$ – 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 Δu_{ki} – i -я компонента вектора ΔY_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 развертывающего 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 α и длительность тактового интервала a .

Результаты исследований представлены в виде так называемой карт 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 ΔU .

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.