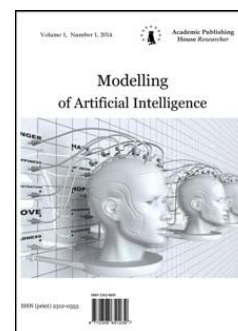


Copyright © 2014 by Academic Publishing House *Researcher*

Published in the Russian Federation
 Modeling of Artificial Intelligence
 Has been issued since 2014.
 ISSN: 2312-0355
 Vol. 4, No. 4, pp. 152-158, 2014

DOI: 10.13187/mai.2014.4.152

www.ejournal11.com

UDC 51-74:621

Mathematical Modeling of Nonlinear Dynamics of Single-Phase Power Factor Correction

¹ Aleksey I. Andriyanov² Igor Yu. Butarev

¹ Bryansk State Technical University, Russian Federation
 7, Bulvar 50-letiya Oktyabrya, Bryansk, 241035
 PhD (technical), Associate Professor
 E-mail: ahaos@mail.ru

² Bryansk State Technical University, Russian Federation
 7, Bulvar 50-letiya Oktyabrya, Bryansk, 241035
 graduate student
 E-mail: igorbutarev@gmail.com

Abstract

The analysis of nonlinear dynamic properties of monophasic power-factor correctors is executed on the basis of mathematical design. A two-parameter map over the dynamic modes, a self-reactance bifurcation diagram and a diagram of trajectories, is brought. On the basis of the got information the scientific-grounded going is possible near the choice of optimum power part on the stage of planning, taking into account not-linear dynamic properties.

Keywords: power-factor corrector; nonlinear dynamics; project dynamic mode; power-factor.

Введение

Активные корректоры коэффициента мощности нашли широкое применение в составе современных источников электропитания. Основной задачей корректора коэффициента мощности является формирование синусоидального потребляемого тока, совпадающего по фазе с сетевым напряжением, что позволяет исключить потребление реактивной мощности, а также мощности искажений, негативно влияющей на потребителей, подключенных к той же сети.

Корректоры коэффициента мощности представляют собой замкнутые системы автоматического управления, имеющие в своем составе как контур тока, так и контур напряжения. Наилучшее качество потребляемого из сети тока обеспечивают корректоры мощности на основе повышающего преобразователя, работающего в режиме непрерывных токов [1].

Практика показывает, что при работе активных корректоров коэффициента мощности возможно возникновение нештатных динамических режимов, что сопровождается значительным снижением коэффициента мощности на входе и, соответственно, ростом искажений напряжения сети, к которой они подключены [2, 3]. Определение коэффициента

мощности дано в [1]. Исключение неprojektных режимов может быть выполнено как с использованием параметрического синтеза, когда выбирается определенный набор параметров, обеспечивающих проектный режим, так и с помощью структурного синтеза, когда проектный режим обеспечивается системой управления, реализующей специализированный алгоритм управления. Указанные методы соответствуют так называемому бифуркационному подходу к проектированию [2, 3].

На сегодняшний день подавляющее большинство работ, посвящено исследованию нелинейной динамики преобразователей постоянного напряжения [2, 3]. Основным отличием корректоров коэффициента мощности от указанного класса систем является наличие внешнего периодического воздействия с частотой сети, что и определяет период повторяемости динамических процессов в подобных системах.

Корректор коэффициента мощности на основе повышающего преобразователя являлся объектом исследования целого ряда работ [4–6]. Основной их чертой является исследование физических явлений в рассматриваемых системах, зачастую базирующихся лишь на использовании метода установления, что ограничивает возможности бифуркационного анализа таких систем [7-10].

Кроме того, на сегодняшний день не сформированы требования к проектному динамическому режиму в однофазных корректорах коэффициента мощности. Данные требования будут существенно отличаться от требований к проектным динамическим режимам преобразователей постоянного напряжения.

Постановка задачи

Функциональная схема корректора коэффициента мощности представлена на рис. 1. Здесь приняты следующие обозначения: R – активное сопротивление дросселя, L – индуктивность дросселя, C – емкость конденсатора, R_H – сопротивление нагрузки, U_m – амплитуда входного напряжения, ω – частота входного синусоидального напряжения, $U_{зн}$ – задание на напряжение, $U_{зт}$ – задание на ток, U_H – импульсы управления силовым ключом, $U_{осн}$ – напряжение обратной связи по напряжению, $U_{ост}$ – напряжение обратной связи по току, $U_{ошт}$ – ошибка по напряжению, $U_{ошт}$ – ошибка по току, U_{yh} – сигнал управления напряжением, U_{yt} – сигнал управления током, R_H – сопротивление нагрузки, U_p – развертывающее напряжение, α_1 – коэффициент усиления пропорционального регулятора напряжения, α_2 – коэффициент усиления пропорционального регулятора тока, β_1 – масштабный коэффициент цепи обратной связи по напряжению, β_2 – масштабный коэффициент цепи обратной связи по току, β_3 – коэффициент датчика выходного напряжения выпрямителя.

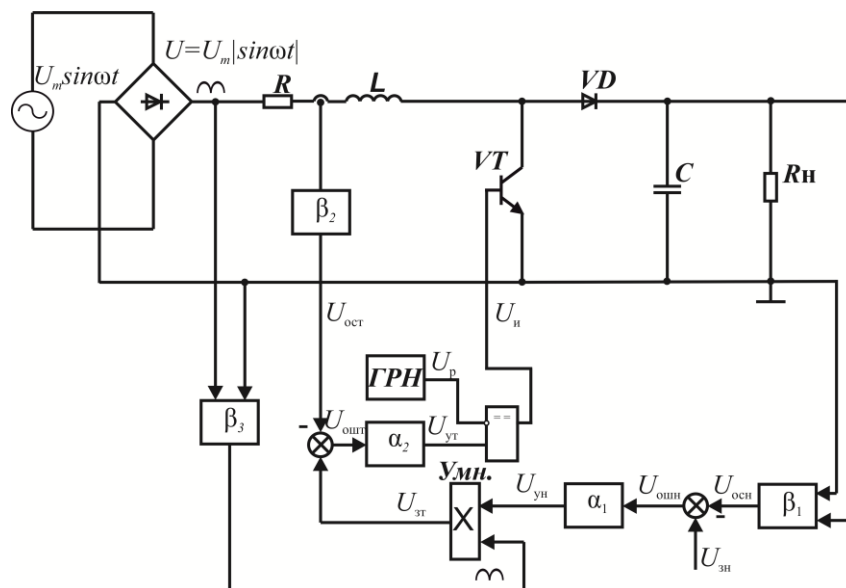


Рис. 1. Функциональная схема корректора коэффициента мощности

Как известно, импульсные преобразователи напряжения описываются кусочно-гладкими математическими моделями. В случае синусоидального входного напряжения, решение системы дифференциальных уравнений на любом участке гладкости имеет вид:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_i(t-t_0)} \mathbf{X}_0 + [\mathbf{e}^{\mathbf{A}_i(t-t_0)} \{ \mathbf{A}_i \sin(\omega t_0) + \mathbf{E} \omega \cos(\omega t_0) \} - \{ \mathbf{A}_i \sin(\omega t) + \mathbf{E} \omega \cos(\omega t) \}] (\mathbf{A}_i^2 + \omega^2 \mathbf{E})^{-1} \mathbf{B}_i \text{sign}(\sin[\omega t]),$$

где \mathbf{X}_0 – вектор переменных состояния в начале участка, \mathbf{A}_i – матрица параметров на i -м участке постоянства структуры в рамках тактового интервала, \mathbf{E} – единичная матрица, ω – частота входного синусоидального напряжения.

В дальнейшем используем относительное время $z = \frac{t - (k-1)a}{a}$, где a – длительность

тактового интервала. Очевидно, что в пределах k -го тактового интервала оно изменяется от 0 до 1.

Таким образом, решение задачи Коши на произвольном i -м участке гладкости k -го тактового интервала имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(z) = & \mathbf{e}^{\mathbf{A}_i(z-z_{ki-1})a} \mathbf{X}_{t_{ki-1}} + [\mathbf{e}^{\mathbf{A}_i(z-z_{ki-1})a} \times \\ & \times \{ \mathbf{A}_i \sin(\omega(k-1+z_{ki-1})a) + \mathbf{E} \omega \cos(\omega(k-1+z_{ki-1})a) \} - \\ & - \{ \mathbf{A}_i \sin(\omega(k-1+z)a) + \mathbf{E} \omega \cos(\omega(k-1+z)a) \}] \times \\ & \times (\mathbf{A}_i^2 + \omega^2 \mathbf{E})^{-1} \mathbf{B}_i \text{sign}(\sin[\omega(k-1+z)a]), \end{aligned}$$

где z_{ki-1} – начало i -го участка на k -м тактовом интервале в относительном времени, $\mathbf{X}_{t_{ki-1}}$ – вектор переменных состояний в момент z_{ki-1} .

В итоге получаем математическую модель в форме стробоскопического отображения для систем с внешним периодическим воздействием с кратностью квантования q

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_p = & \prod_{i=1}^q \mathbf{N}_i^{n_k}(\mathbf{Z}_i^a) \mathbf{X}_{p-1} + \sum_{j=1}^{q-1} \left[\prod_{l=j+1}^q \mathbf{N}_l^{n_k}(\mathbf{Z}_l^a) \{ \mathbf{K}_j^{n_k}(\mathbf{Z}_j^a) + \mathbf{L}_j^{n_k}(\mathbf{Z}_j^a) \} \right] + \\ & + \mathbf{K}_q^{n_k}(\mathbf{Z}_q^a) + \mathbf{L}_q^{n_k}(\mathbf{Z}_q^a), \end{aligned}$$

где p – номер итерации отображения системы с внешним периодическим воздействием, $\mathbf{Z}_k^a = \{z_{k0}, z_{k1}, \dots, z_{knk}\}$, $n_k = 2, 3, 4, \dots$ – число коммутаций на k -м тактовом интервале на периоде системы (в данном случае $n_k = 4$); $\mathbf{N}_i^j(\mathbf{Z}_i^a)$, $\mathbf{K}_i^j(\mathbf{Z}_i^a)$ – некоторые функции.

Под кратностью квантования q понимается отношение частоты широтно-импульсной модуляции к частоте входного напряжения.

В рамках обобщенной модели, адаптированной для корректоров коэффициента мощности, рассматриваются следующие моменты коммутаций, происходящих на тактовом интервале:

- момент коммутации $z_{k0} = 0$ – начало тактового интервала;
- момент коммутации z_{k1} связан с коммутацией силового ключа;
- момент коммутации z_{k2} связан с коммутацией силового диода;
- момент коммутации $z_{k3} = 1$ – конец тактового интервала.

Моменты коммутации на тактовом интервале в относительном времени находятся по выражению

$$z_{kn} \rightarrow \xi_{kn}(\mathbf{X}_{t_{kn-1}}, z_{kn}) = 0, \text{ при } n=1, 2, \dots, n_k-1,$$

где $\xi_{kn}(\mathbf{X}_{t_{kn-1}}, z_{kn})$ – функции, определяющие гиперповерхность разрыва в фазовом пространстве на тактовом интервале, связанные с n -й коммутацией. Здесь $\mathbf{X}_{t_{kn-1}}$ – вектор фазовых переменных в $n-1$ -й момент коммутации на k -м тактовом интервале.

Исследование нелинейной динамики корректора коэффициента мощности проводилось с использованием универсальной математической модели преобразователей напряжения и специализированных алгоритмов, рассмотренных в [7].

В ходе расчетов выбран следующий набор параметров: $U_m=311$ В, $\omega=314$ гц, $R_n=150$ Ом, $f_{кв}=40$ кГц, $R=1$ ом, $L=0.8$ мГн, $C=25$ мкФ, $U_p=10$ В, $U_{зн}=7$ В, $\alpha_1=50$, $\alpha_2=0.5$, $\beta_1=0.015$, $\beta_2=1$, $\beta_3=0.0015$, коэффициент мощности не менее $K_{Mmin}=0,8$.

На рис. 2 представлена карта динамических режимов, на которой отмечены области существования различных режимов в пространстве двух параметров: напряжения задания на напряжение $U_{зн}$ и амплитуды входного напряжения U_m . На карте символами Π_{ij} 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 ω (1-цикл). Область Π_x – соответствует недетерминированным режимам функционирования преобразователя ($m \rightarrow \infty$).

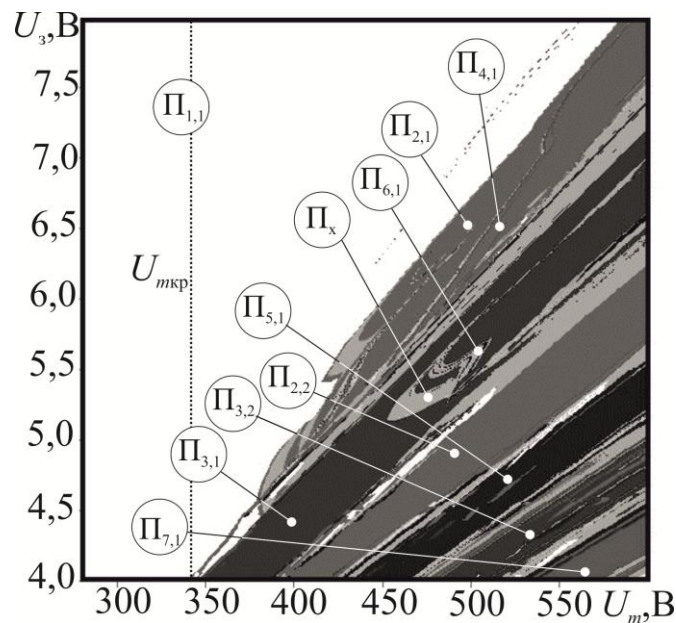


Рис. 2. Карта динамических режимов корректора коэффициента мощности

Как видно из рис. 2, при амплитуде входного напряжения менее $U_{ткр}=339$ В в системе во всем диапазоне вариации задающего воздействия реализуется 1-цикл. Однако при высоких входных напряжениях в результате бифуркации возникают непроектные режимы с частотой повторяемости меньше, чем напряжение сети.

На рис. 3 представлена однопараметрическая бифуркационная диаграмма и диаграмма мультипликаторов матрицы монодромии периодических режимов.

Анализ показывает, что при увеличении амплитуды входного напряжения мультипликаторы претерпевают множественные разрывы первого рода. В точках разрывов реализуются С-бифуркации смены типа решения, при которых изменяется число участков гладкости на периоде решения [3]. Таким образом, при $U_m \in [300 \text{ В} - 520 \text{ В}]$ существует 1-цикл, но при изменении амплитуды входного напряжения постоянно меняется его тип.

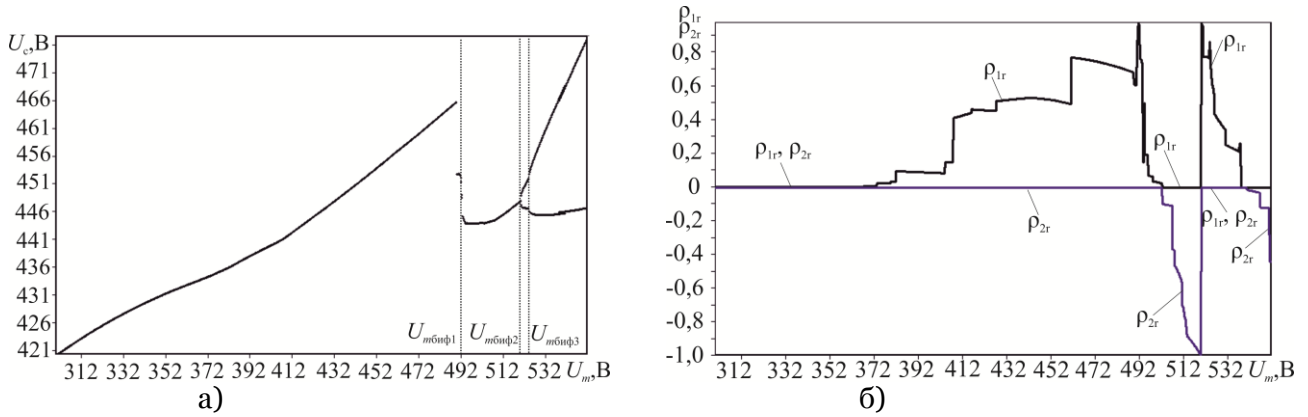


Рис. 3. Однопараметрические диаграммы: а) бифуркационная диаграмма; б) диаграмма мультипликаторов периодических режимов

При $U_{m\text{биф}1}=492$ В происходит смена типа решения 1-цикла, приводящая к существенному изменению формы входного тока, также одновременно резко меняются и мультипликаторы (рис. 3, б). В точке бифуркации $U_{m\text{биф}2}=520$ В происходит классическая суперкритическая бифуркация, при которой действительная часть одного из мультипликаторов пересекает -1 после чего возникает цикл удвоенного периода. При $U_{m\text{биф}3}=524$ В происходит бифуркация смены типа решения, в результате которой возникает 2-цикл другого типа.

Таким образом, под проектным режимом корректора коэффициента мощности будем понимать цикл периода один, при котором коэффициент мощности входит в заданный диапазон, при этом коэффициенты заполнения ШИМ на некоторых тактовых интервалах могут принимать значения 0 или 1, что отличается от требований к проектному режиму преобразователей постоянного напряжения [2, 3].

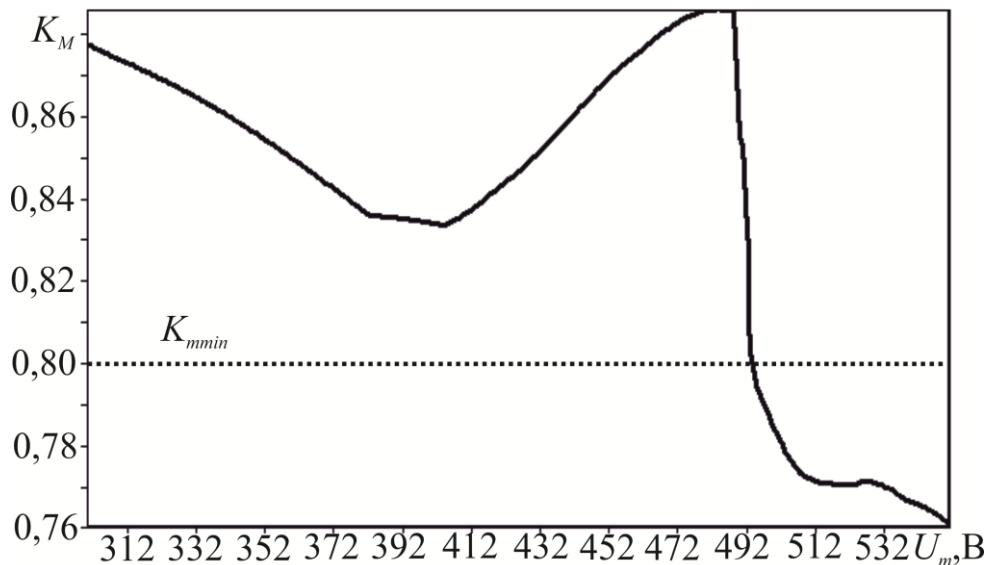


Рис. 4. Однопараметрические диаграммы коэффициента мощности

Примечания:

1. Мелешин В.И., Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера. 2005, 627 с.
2. Баушев, В.С. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием / В.С. Баушев, Ж.Т. Жусубалиев // Электричество, 1992. № 8. С. 47–53.
3. Жусубалиев, Ж. Т. Бифуркации и хаос в релейных и широтно–импульсных системах автоматического управления / Ж.Т. Жусубалиев, Ю.В. Колоколов. М.: Машиностроение-1, 2001, 120 с.
4. Андриянов, А.И. Модель корректора коэффициента мощности с управлением внутри одного тактового цикла / А.И. Андриянов, А.А. Малаханов // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1.1(27). С. 108-113.
5. Giaouris, D. Control of Fast Scale Bifurcations in Power-Factor Correction Converters / D. Giaouris, S. Banerjee, B. Zahavi, V. Pickert // IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs. 2007. vol. 54, № 9. p. 805-809.
6. Wu, X. Fast-Scale Instability of Single-Stage Power-Factor-Correction Power Supplies / X. Wu, C.K. Tse, O. Dranga, J. Lu // Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium on. 2005. vol. 3. p. 2477-2480.
7. Андриянов, А.И. Алгоритмы для бифуркационного анализа обобщенной модели преобразователей постоянного напряжения / А.И. Андриянов, Н.И. Булохов // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 10. С. 30–39.
8. Andriyanov, A.I. A Comparative Characteristic of Different Kinds of Pulse-Width Respect to the Topology of Regions of Existence of Periodic Operating Conditions / A.I. Andriyanov, G.Ya. Mikhhalchenko // Electrical Technology, 2004. № 4. P. 166-181.
9. Андриянов, А.И. Сравнительная характеристика различных видов широтно-импульсной модуляции по топологии областей существования периодических режимов / А.И. Андриянов, Г.Я. Михальченко // Электричество. 2004. № 12. С. 46-54.
10. Малаханов, А.А. Модель однофазного корректора коэффициента мощности с интегрированием внутри такта / А.А. Малаханов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2007. №1 (13). С. 33-42.

References:

1. Meleshin V.I., Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika. M.: Tekhnosfera.2005, 627 s.
2. Baushev, V.S. O nedeterminirovannykh rezhimakh funktsionirovaniya stabilizatora napryazheniya s shirotno-impul'snym regulirovaniem / V.S. Baushev, Zh.T. Zhusubaliev // Elektrichestvo, 1992. № 8. С. 47–53.
3. Zhusubaliev, Zh. T. Bifurkatsii i khaos v releinykh i shirotno–impul'snykh sistemakh avtomaticheskogo upravleniya / Zh.T. Zhusubaliev, Yu.V. Kolokolov. M.: Mashinostroenie-1, 2001, 120 s.
4. Andriyanov, A.I. Model' korrektora koeffitsienta moshchnosti s upravleniem vnutri odnogo taktovogo tsikla / A.I. Andriyanov, A.A. Malakhanov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2007. № 1.1(27). S. 108-113.
5. Giaouris, D. Control of Fast Scale Bifurcations in Power-Factor Correction Converters / D. Giaouris, S. Banerjee, B. Zahavi, V. Pickert // IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs. 2007. vol. 54, № 9. p. 805-809.
6. Wu, X. Fast-Scale Instability of Single-Stage Power-Factor-Correction Power Supplies / X. Wu, C.K. Tse, O. Dranga, J. Lu // Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium on. 2005. vol. 3. p. 2477-2480.
7. Andriyanov, A.I. Algoritmy dlya bifurkatsionnogo analiza obobshchennoi modeli preobrazovatelei postoyannogo napryazheniya / A.I. Andriyanov, N.I. Bulokhov // Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal. 2013. № 10. S. 30–39.
8. Andriyanov, A.I. A Comparative Characteristic of Different Kinds of Pulse-Width Respect to the Topology of Regions of Existence of Periodic Operating Conditions / A.I. Andriyanov, G.Ya. Mikhhalchenko // Electrical Technology, 2004. № 4. P. 166-181.

9. Andriyanov, A.I. Sravnitel'naya kharakteristika razlichnykh vidov shirotno-impul'snoi modulyatsii po topologii oblasti sushchestvovaniya periodicheskikh rezhimov / A.I. Andriyanov, G.Ya. Mikhal'chenko // Elektrichestvo. 2004. № 12. S. 46-54.

10. Malakhanov, A.A. Model' odnofaznogo korrektora koeffitsienta moshchnosti s integrirovaniem vnutri takta / A.A. Malakhanov // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. №1 (13). S. 33-42.