

РЕГУЛЯРНАЯ И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Часть 1

Динамика частотно-фазовой системы с одинаковыми фильтрами первого порядка в цепях управления

В. П. Пономаренко

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Изложены результаты исследования режимов динамического поведения автогенераторной системы с частотно-фазовым управлением при использовании инверсно включенного многочастотного дискриминатора в цепи частотного управления в случае одинаковых фильтров первого порядка в цепях фазового и частотного управления. Исследование проведено на основе математической модели системы с одной степенью свободы с применением качественно-численных методов нелинейной динамики. Показано, что в такой системе возможно существование как синхронного режима, так и множества периодических несинхронных режимов. Установлено расположение областей параметров с различными динамическими режимами системы, изучены процессы, развивающиеся в области неустойчивости синхронного режима.

Ключевые слова: Системы с частотно-фазовым управлением, динамические состояния, устойчивость, бифуркации, фазовые портреты, режим синхронизации, несинхронные режимы.

Введение

Двухкольцевые системы фазовой синхронизации с цепями управления по фазе и частоте, иначе называемые системами частотно-фазовой автоподстройки (ЧФАП), являются интересными объектами теории колебаний и нелинейной динамики и представляют большой интерес для ряда приложений: стабилизация частоты колебаний, оптимальный прием, синхронизация и слежение, в том числе, в спутниковых радионавигационных системах, информационно-телекоммуникационные системы передачи и обработки информации, в том числе системы с использованием динамического хаоса [1–6] и др. В основе функционирования систем ЧФАП лежит принцип автоматической подстройки частоты колебаний управляемого (перестраиваемого) гене-

ратора к частоте колебаний внешнего (эталонного) сигнала. Исследования нелинейной динамики систем ЧФАП [7–12] показали, что благодаря наличию цепей фазового и частотного управления в таких системах реализуются многие динамические состояния и бифуркационные переходы, которые свойственны автоколебательным системам со сложной динамикой. Основным режимом систем ЧФАП при решении традиционных задач синхронизации и слежения является режим фазовой синхронизации, которому соответствуют моногармонические колебания управляемого генератора на частоте внешнего сигнала. В задачах генерации сложных регулярных и хаотических колебаний основными динамическими состояниями систем являются несинхронные режимы с непостоянными величинами фазового и частотного расстройств управляемого и внешнего колебаний (квазисинхронные и асинхронные [5]). Несинхронным режимам соответствуют периодические, квазипериодические и хаотические режимы автомодуляции фазы колебаний управляемого генератора. Использование несинхронных режимов в качестве основных рабочих процессов систем ЧФАП позволяет расширить их функциональные возможности, которые могут найти применение, в частности, для создания на основе таких систем источников фазового хаоса для прямохаотических систем передачи данных [13,14].

В связи с возможностью расширения области применения систем с частотно-фазовым управлением за счет использования несинхронных режимов приобретает актуальность проблема поиска эффективных путей увеличения набора возможных автомодуляционных колебаний различной сложности и областей их существования. В качестве таких путей естественно рассматривать модификации цепей управления – усложнение фильтров низких частот (ФНЧ) и нелинейных характеристик дискриминаторов, а также использование в кольце частотного управления положительной, вместо традиционной отрицательной, обратной связи, которую легко реализовать инверсным включением частотного дискриминатора [15]. Исследование динамики отдельной системы с частотным управлением при инверсии характеристики частотного дискриминатора показали [15–19], что в такой системе создаются условия для активного взаимодействия автомодуляционных колебаний, что делает систему богаче в отношении сложной динамики. Интересные свойства динамического поведения системы с частотным управлением обнаружены при использовании частотного дискриминатора, работающего не по одной переходной частоте, а на множестве переходных частот (так называемого многочастотного дискриминатора). Такой дискриминатор реализуется на основе фазового дискриминатора и линии задержки [20–22]. В этом случае поведение системы с частотным управлением качественно подобно поведению системы автофазирования (фазовой системы с управляемым фазовращателем) [23–26] и характеризуется счетным числом режимов стационарной генерации и возможностью возникновения режимов хаотических колебаний на многоспиральных аттракторах.

В данной работе исследуются особенности динамического поведения системы ЧФАП с инверсно включенным многочастотным дискриминатором в цепи частотного управления, имеющим синусоидальную характеристику, и одинаковыми ФНЧ первого порядка в цепях частотного и фазового управления. В работе показано, что в такой системе возможно существование периодического квазисинхронного режима и множества различных периодических асинхронных режимов.

1. Математическая модель системы

Нелинейная динамика системы ЧФАП описывается следующим уравнением для разности фаз φ внешнего и управляемого колебаний, записанным в операторной форме ($p \equiv d/dt$) [1]

$$p\varphi + \Omega_1 K_1(p) F(\varphi) + \Omega_2 K_2(p) \Phi(p\varphi) = \delta\omega. \quad (1)$$

Здесь $K_1(p)$ и $K_2(p)$ – коэффициенты передачи ФНЧ в цепях управления; $F(\varphi)$ и $\Phi(p\varphi)$ – характеристики фазового и частотного дискриминаторов, нормированные на единицу; Ω_1 и Ω_2 – коэффициенты усиления по цепям управления; $\delta\omega$ – начальная расстройка частот внешнего и управляемого колебаний. Характеристики дискриминаторов будем аппроксимировать функциями $F(\varphi) = \sin \varphi$ и $\Phi(p\varphi) = -\sin(\beta_1 p\varphi)$, где β_1 – параметр частотного дискриминатора [5,22]. Знак «минус» в выражении для $\Phi(p\varphi)$ соответствует инверсному включению частотного дискриминатора.

В данной работе будем рассматривать случай, когда в цепях управления используются одинаковые интегрирующие ФНЧ первого порядка с коэффициентами передачи $K_1(p) = K_2(p) = 1/(1 + a_1 p)$, где a_1 – постоянная времени. Математическая модель системы ЧФАП с такими ФНЧ представляется получаемой из уравнения (1) динамической системой с цилиндрическим фазовым пространством $U_1 = (\varphi \pmod{2\pi}, u)$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = u, \quad \frac{du}{d\tau} = \gamma - \sin \varphi - \lambda u + b \sin(\beta \lambda u), \quad (2)$$

где $\tau = t(\Omega_1 a_1)^{1/2}$, $\lambda = (\Omega_1 a_1)^{-1/2}$, $b = \Omega_2/\Omega_1$, $\beta = \beta_1 \Omega_1$, $\gamma = \delta\omega/\Omega_1$.

Исследование полной картины нелинейной динамики рассматриваемой системы ЧФАП на основе модели (2) сопряжено с существенными трудностями, в связи с чем в качестве основного метода ее исследования применено компьютерное моделирование, которое базируется на качественных и численных методах нелинейной динамики [27] и использовании программного комплекса «ДНС» [28].

2. Нелинейная динамика модели (2)

В системе (2) параметры λ , b , $\beta > 0$ по физическому смыслу. В силу инвариантности системы (2) относительно замены $(\varphi, u, \gamma) \rightarrow (-\varphi, -u, -\gamma)$ достаточно рассмотреть ее при значениях $\gamma \geq 0$. Движения системы (2) будем исследовать на развертке фазового цилиндра U_1 на часть $-\pi < \varphi < \pi$ плоскости (φ, x) . Разбиение фазового цилиндра U_1 на траектории системы (2) определяют [27] состояния равновесия, предельные циклы первого и второго рода (соответственно колебательные и вращательные) и сепаратрисы седел. Особые траектории системы (2) имеют применительно к динамике рассматриваемой системы ЧФАП следующий физический смысл. Устойчивое состояние равновесия соответствует режиму синхронизации. Устойчивый предельный цикл колебательного типа (не охватывающий фазовый цилиндр) определяет квазисинхронный режим с периодически изменяющимися величинами рассогласований φ и u . Устойчивый предельный цикл вращательного типа (охватывающий фазовый цилиндр) отвечает асинхронному режиму с вращением

фазы, в котором рассогласование фаз φ неограниченно нарастает (при $\gamma > 0$) или убывает (при $\gamma < 0$), а разность частот u периодически изменяется относительно некоторого среднего значения.

Система (2) при значениях $0 \leq \gamma < 1$ имеет два состояния равновесия $A_1(\arcsin \gamma, 0)$ и $A_2(\pi - \arcsin \gamma, 0)$. Состояние равновесия A_1 устойчиво при значениях $b < \beta^{-1}$ и неустойчиво при $b > \beta^{-1}$, состояние равновесия A_2 – седло. Вычисляя первую ляпуновскую величину L [29] на границе области устойчивости $b = \beta^{-1}$, получаем $L(b = \beta^{-1}) = -\pi(1 - \gamma^2)^{1/4} \beta^2 \lambda^3 / 8 < 0$, то есть граница области устойчивости A_1 является «безопасной».

На рис. 1 приведен параметрический портрет системы (2) на плоскости параметров (γ, b) , построенный по результатам численного исследования системы при значениях параметров $\lambda = 0.2$, $\beta = 8$. Линия l_0 ($b = \beta^{-1}$) на рис. 1 – это граница области устойчивости состояния равновесия A_1 . При переходе с возрастанием параметра b через значение $b = \beta^{-1}$ происходит рождение на фазовом цилиндре U_1 устойчивого предельного цикла S_0 колебательного типа, охватывающего неустойчивое состояние равновесия A_1 , то есть режим синхронизации в системе ЧФАП мягко сменяется квазисинхронным режимом цикла S_0 . В этом режиме диапазон колебаний величины разности фаз φ не превосходит 2π .

Кривая d_0 на рис. 1, проходящая в области значений $b > \beta^{-1}$, отвечает петле сепаратрис первого рода Π_0 седла A_2 . Петля Π_0 содержит внутри себя предельный цикл S_0 . Так как седловая величина $\sigma = \lambda(b\beta - 1) > 0$, то петля Π_0 неустойчивая [27], при пересечении с возрастанием b кривой d_0 из петли Π_0 рождается неустойчивый колебательный предельный цикл Γ_0 , также содержащий внутри себя

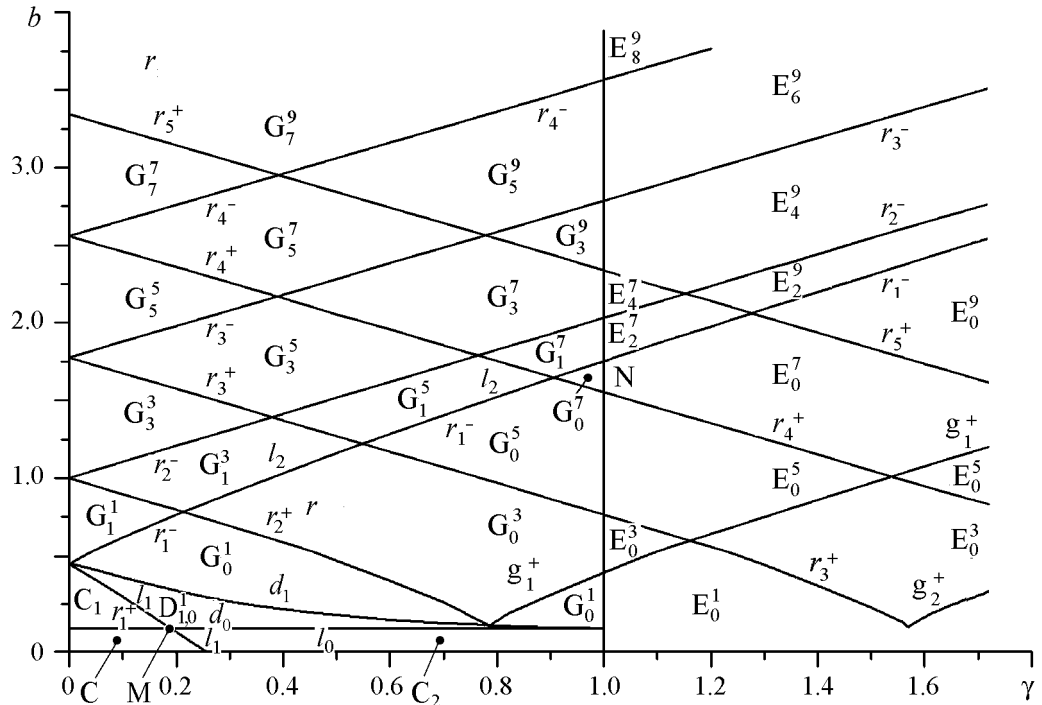


Рис. 1. Параметрический портрет (γ, b) модели (2) при значениях $\lambda = 0.2$, $\beta = 8$

устойчивый предельный цикл S_0 и неустойчивое состояние равновесия A_1 . Кривая d_1 , проходящая выше кривой d_0 близко к ней, соответствует бифуркации двойного предельного цикла колебательного типа, который образуется в результате слияния предельных циклов S_0 и Γ_0 . При пересечении кривой d_1 в сторону убывания параметра b происходит рождение устойчивого и неустойчивого предельных циклов S_0 и Γ_0 .

Кривые l_1 и l_2 на рис. 1 отвечают петлям сепаратрис второго рода Π_1 и Π_2 седла A_2 , охватывающим фазовый цилиндр U_1 и расположенным на U_1 соответственно в областях $u > 0$ и $u < 0$. Точка M на кривой l_1 соответствует обращению в ноль седловой величины σ и делит кривую l_1 на две части: l_1^- – выше точки M и l_1^+ – ниже точки M . Петля сепаратрис Π_1 неустойчивая ($\sigma > 0$) на кривой l_1^- и устойчивая ($\sigma < 0$) на кривой l_1^+ . При пересечении кривой l_1^+ с увеличением параметров b или γ петля Π_1 разрушается, из нее рождается устойчивый вращательный предельный цикл в области $u > 0$ фазового цилиндра. При пересечении кривой l_1^- в сторону убывания b или γ из петли Π_1 рождается неустойчивый вращательный предельный цикл в области $u > 0$ фазового цилиндра. Петля сепаратрис Π_2 неустойчивая ($\sigma > 0$), при пересечении кривой l_2 с увеличением γ или с уменьшением b (с уменьшением γ или с увеличением b) эта петля разрушается, из нее рождается (с ней сливается и исчезает) неустойчивый вращательный предельный цикл, расположенный в области $u < 0$ фазового цилиндра.

Кроме бифуркационных кривых l_0, d_0, d_1, l_1 и l_2 при численном исследовании системы (2) установлено существование на диаграмме (γ, b) множеств бифуркационных кривых r_i^+, g_i^+ и r_i^- ($i = 1, 2, 3, \dots$), отвечающих образованию на фазовом цилиндре U_1 двойных (полуустойчивых) вращательных предельных циклов, расположенных на U_1 соответственно в областях $u > 0$ и $u < 0$. Некоторые из таких кривых – кривые $r_1^+, r_2^+, r_3^+, r_4^+, r_5^+, g_1^+, g_2^+$ и кривые $r_1^-, r_2^-, r_3^-, r_4^-$ приведены на рис. 1. При пересечении кривых r_i^+ в сторону возрастания параметра b на фазовом цилиндре в области $u > 0$ появляются пары вращательных предельных циклов – верхний устойчивый L_i^+ и нижний неустойчивый Γ_i^+ .

При пересечении кривых g_i^+ с увеличением параметра b на фазовом цилиндре в области $u > 0$ появляются пары вращательных предельных циклов, из которых верхний неустойчивый, а нижний устойчивый. При переходе с возрастанием b через кривые r_i^- на фазовом цилиндре U_1 в области $u < 0$ также появляются пары вращательных предельных циклов – верхний Γ_i^- неустойчивый и нижний L_i^- устойчивый.

Отметим, что при рассматриваемых значениях параметров λ и β кривая r_1^+ проходит ниже кривой l_1^- вблизи нее, а кривая r_1^- проходит ниже кривой l_2 близко к ней. На рис. 2 приведен фрагмент (γ, b) -диаграммы, на котором

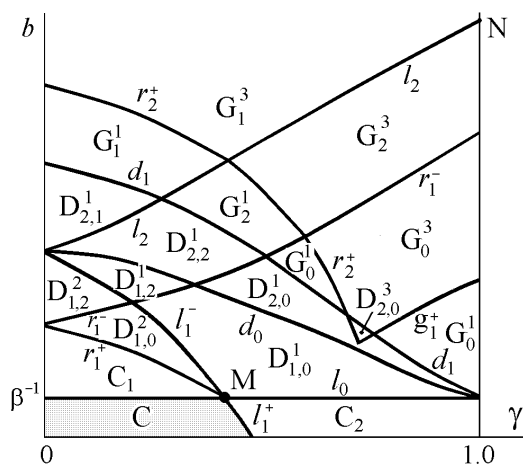


Рис. 2. Фрагмент параметрического портрета (γ, b) модели (2)

качественно изображено взаимное расположение бифуркационных кривых $l_1, r_1^+, l_2, r_1^-, d_0$ и d_1 . Часть линии $\gamma = 1$ выше точки N (см. рис. 1,2) соответствует петле сепаратрисы седло-узла второго рода Π_3 в области $u < 0$. При пересечении этой части линии $\gamma = 1$ в сторону возрастания параметра γ петля Π_3 разрушается, из нее рождается неустойчивый вращательный предельный цикл в области $u < 0$ на фазовом цилиндре U_1 .

Примечательно, что картина расположения бифуркационных кривых на рис. 1, соответствующих образованию двойных вращательных предельных циклов, напоминает приведенное в [23, 24] разбиение плоскости параметров «коэффициент усиления цепи управления – начальная частотная расстройка» на области с различным числом состояний равновесия модели системы автоматического фазирования (или системы с частотным управлением при синусоидальной характеристике частотного дискриминатора).

Бифуркационные кривые, приведенные на рис. 1, 2, выделяют на плоскости (γ, b) области параметров с качественно различным поведением модели (2). На рис. 3–5 представлены примеры фазовых портретов системы (2) для некоторых из этих областей. В области C, заключенной между частями кривой l_1^+ и частями линий $l_0, b = 0$ и $\gamma = 0$, система (2) не имеет предельных циклов, единственным

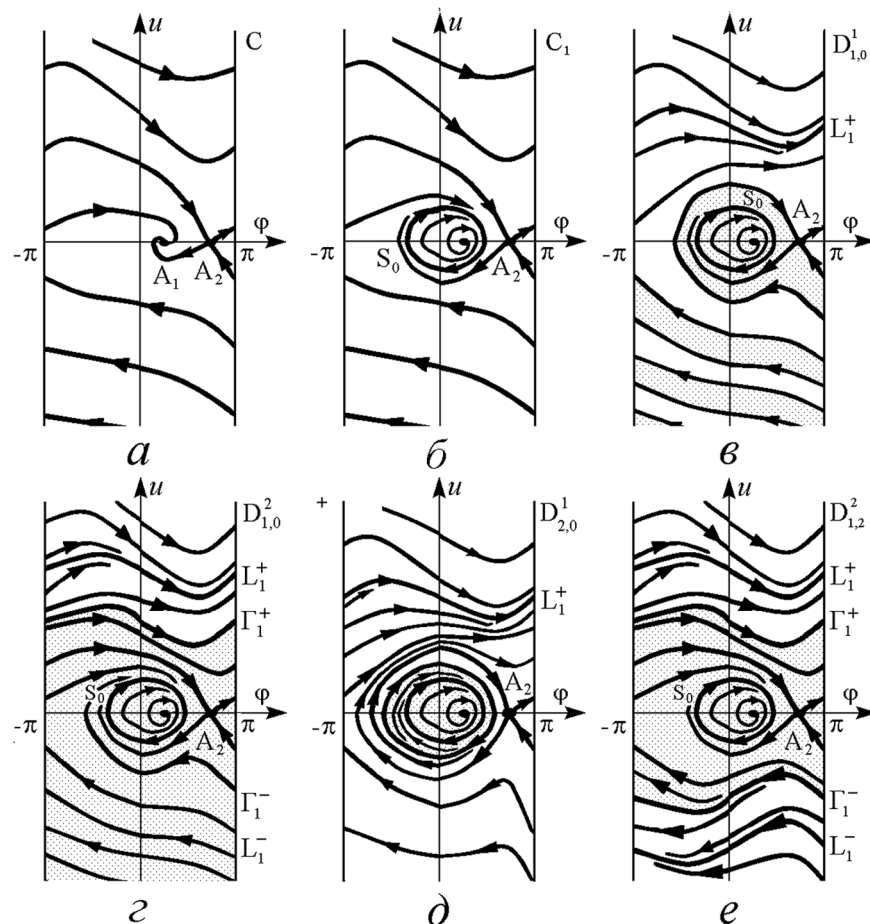


Рис. 3. Фазовые портреты модели (2), соответствующие областям C, C₁, D_{1,0}¹, D_{1,0}², D_{2,0}¹ и D_{1,2}² на диаграмме (γ, b)

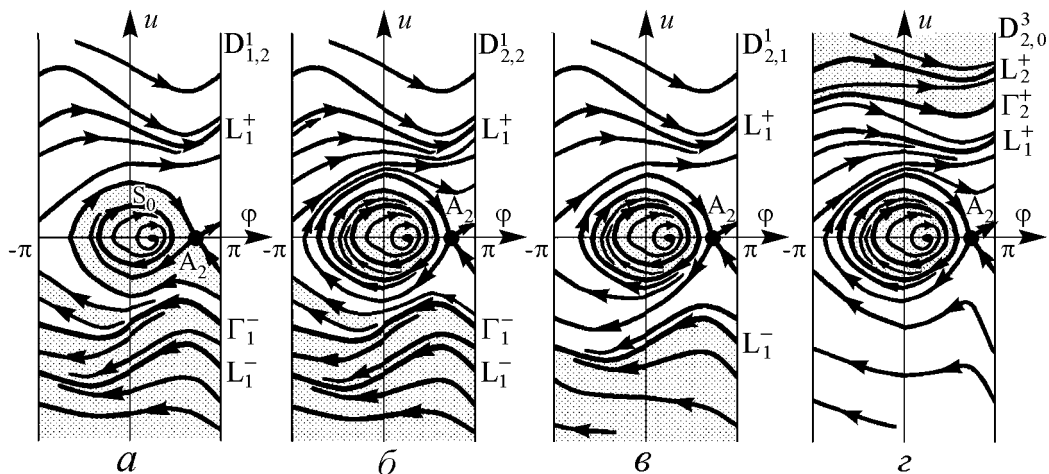


Рис. 4. Фазовые портреты модели (2), соответствующие областям $D_{1,2}^1$, $D_{2,2}^1$, $D_{2,1}^1$ и $D_{2,0}^3$ на диаграмме (γ, b)

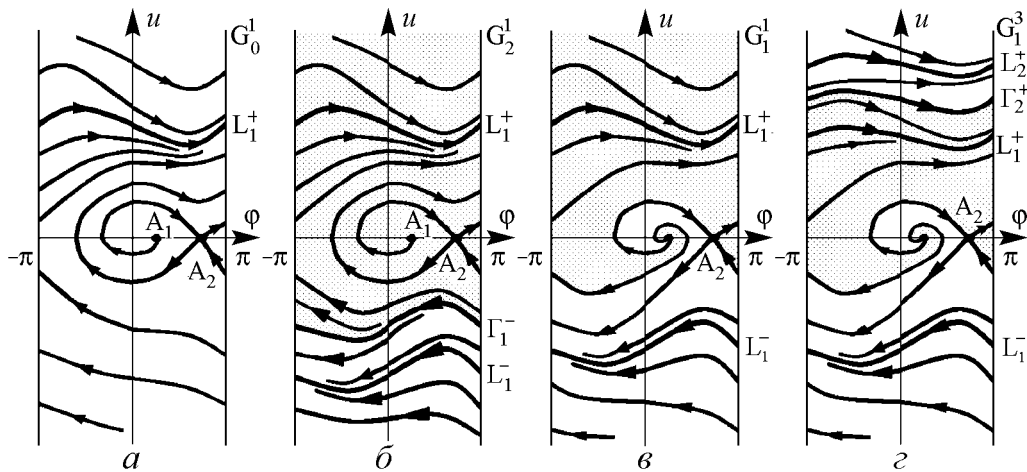


Рис. 5. Фазовые портреты модели (2), соответствующие областям G_0^1 , G_2^1 , G_1^1 и G_1^3 на диаграмме (γ, b)

аттрактором на фазовом цилиндре U_1 является состояние равновесия A_1 (рис. 3, а), то есть система обладает свойством глобальной асимптотической устойчивости. Для значений $(\gamma, b) \in C$ в системе ЧФАП реализуется режим синхронизации при любых начальных значениях φ и u .

При значениях γ и b из области C_1 , заключенной между частями кривых l_0 и r_1^+ (см. рис. 2), предельный цикл S_0 является единственным аттрактором системы (2) (рис. 3, б), следовательно, в системе ЧФАП независимо от начальных условий устанавливается периодический квазисинхронный режим цикла S_0 . Это режим периодической автомодуляции фазы колебаний управляемого генератора. В области параметров G_0^1 единственным аттрактором модели (2) на фазовом цилиндре U_1 является вращательный предельный цикл L_1^+ (рис. 5, а), следовательно, в системе ЧФАП при любых начальных условиях устанавливается периодический асинхронный режим цикла L_1^+ . В области C_2 (см. рис. 1, 2) этот асинхронный режим и режим синхронизации существуют в системе ЧФАП одновременно, реализация этих режимов зависит от начальных значений φ и u .

В областях $D_{1,0}^1$, $D_{1,0}^2$, $D_{2,0}^1$, $D_{1,2}^2$, $D_{1,2}^1$, $D_{2,2}^1$, $D_{2,1}^1$ и $D_{2,0}^3$, качественный вид которых представлен на рис. 2, предельный цикл S_0 существует на фазовом цилиндре одновременно с вращательными предельными циклами. В обозначениях этих областей первый нижний индекс означает число колебательных предельных циклов, второй нижний и верхний индексы означают число вращательных предельных циклов, расположенных соответственно в области $u < 0$ и в области $u > 0$ фазового цилиндра. Фазовые портреты системы (2) для областей $D_{1,0}^1$, $D_{1,0}^2$, $D_{2,0}^1$, $D_{1,2}^2$ приведены на рис. 3, в, г, д, е, а для областей $D_{1,2}^1$, $D_{2,2}^1$, $D_{2,1}^1$, $D_{2,0}^3$ – на рис. 4, а, б, в, г, соответственно. Видно, что модель (2) является бистабильной в областях параметров $D_{1,0}^1, D_{1,0}^2, D_{2,0}^1$ (рис. 3, в, г, д) и тристабильной в областях $D_{1,2}^2, D_{1,2}^1, D_{2,2}^1, D_{2,1}^1, D_{2,0}^3$ (рис. 3, е и рис. 4). Для значений параметров из этих областей в системе ЧФАП в зависимости от начальных условий реализуется либо периодический квазисинхронный режим предельного цикла S_0 , либо один из периодических асинхронных режимов предельных циклов L_1^+ и L_1^- .

При значениях $0 \leq \gamma < 1$ в области параметров, расположенной выше кривой d_1 , и при значениях $\gamma > 1$ (см. рис. 1, 2) у системы (2) существуют только вращательные предельные циклы. При этих значениях параметров в системе ЧФАП существуют только периодические асинхронные режимы. В обозначениях областей с асинхронными режимами на рис. 1, 2 нижний и верхний индексы означают число вращательных предельных циклов, расположенных соответственно в области $u < 0$ и в области $u > 0$ фазового цилиндра U_1 . На рис. 5 приведены примеры фазовых портретов модели (2) для значений параметров из областей G_0^1, G_2^1, G_1^1 и G_1^3 . В областях с асинхронными режимами модель (2) является мультистабильной, какой из асинхронных режимов предельных циклов L_i^+ или L_i^- устанавливается в системе ЧФАП – это зависит от начальных значений φ и u . Возрастание параметра b ведет к повышению степени мультистабильности системы за счет увеличения числа асинхронных режимов.

Заключение

Результаты качественно-численного исследования модели (2) показывают, что применение частотного дискриминатора с инвертированной синусоидальной характеристикой в системе ЧФАП с одинаковыми фильтрами первого порядка в цепи частотного и фазового управления приводит к значительному усложнению поведения системы. Это усложнение обусловлено, во-первых, возможностью потери устойчивости режима синхронизации и возникновением периодического квазисинхронного режима, во-вторых, возможностью существования множества различных периодических асинхронных режимов, число которых растет при возрастании параметра b . Таким образом, если в отдельной системе с частотным управлением применение многочастотного дискриминатора с синусоидальной характеристикой обуславливает существование множества состояний равновесия, то в частотно-фазовой системе с таким дискриминатором создаются возможности для реализации множества периодических асинхронных режимов. Асинхронные режимы возникают в результате бифуркаций двойных предельных циклов вращательного типа и петель сепаратрис седлового и седло-узлового состояний равновесия системы (2). Выяснено, что в зависимости от значений параметров для системы (2) характерно существование множества качественно различных типов фазового портрета движений, отличающихся числом и

месторасположением вращательных предельных циклов на фазовом цилиндре. Примечательно, что квазисинхронный режим может существовать одновременно с асинхронными режимами. Сравнение областей глобальной асимптотической устойчивости в моделях системы ЧФАП в случае, когда $K_1(p)=1$, $K_2(p) = 1/(1 + a_1p)$ [30], и в рассматриваемом здесь случае, когда $K_1(p)=K_2(p)=1/(1 + a_1p)$, показывает, что в последнем случае эта область меньше. Этот факт обусловлен влиянием имеющейся в этом случае инерционности цепи фазового управления.

В качестве продолжения исследования, проведенного в данной работе, во второй части работы будут изучены особенности нелинейной динамики рассматриваемой системы ЧФАП в случае применения одинаковых ФНЧ третьего порядка в цепях управления.

Библиографический список

1. *Капранов М.В.* О полосе захвата при частотно-фазовой автоподстройке // Науч. докл. высш. школы. Сер. «Радиотехника и электроника». 1958. Т. 2, № 9. С. 162.
2. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972. 448 с.
3. *Ходаковский В.А., Бычков В.Г.* Оптимальное устройство синхронизации при больших частотных нестабильностях радиоканала // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1974. Т. 17, № 4. С. 29.
4. *Каганов В.И., Терещенко С.В.* Помехоустойчивость двухкольцевой системы автоматического управления // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 3. С. 353.
5. *Шалфеев В.Д., Матросов В.В.* Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. 366 с.
6. *M. Gardner.* Phase lock techniques, third ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2005. 421p.
7. *Пономаренко В.П., Тихонов Е.А.* Динамика автогенератора с частотно-фазовым управлением при инверсии характеристики частотного дискриминатора // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 6. С. 75.
8. *Пономаренко В.П., Тихонов Е.А.* Хаотическая и регулярная динамика автогенераторной системы с нелинейной петлей частотно-фазового управления // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 2. С. 205.
9. *Матросов В.В.* Динамические свойства генератора с частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 4. С. 334.
10. *Матросов В.В.* Моделирование динамики системы частотно-фазовой автоподстройки с фильтрами первого порядка // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. «Математическое моделирование и управление». 2006. Вып. 2(31). С. 17.
11. *Пономаренко В.П.* Динамические режимы в моделях автогенераторных систем с частотным и частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 3. С. 33.
12. *Пономаренко В.П.* Динамические режимы и нелинейные эффекты в автогенераторе с частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 6. С. 18.

13. *Дмитриев А.С., Широков М.Е.* Выбор генератора для прямохаотической системы связи // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 7. С. 840.
14. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Кузьмин Л.В.* Генерация сверхширокополосного хаоса в дециметровом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 7. С. 709.
15. *Пономаренко В.П., Заулин И.А.* Динамика автогенератора, управляемого петлей частотной автоподстройки с инвертированной характеристикой дискриминатора // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 7. С. 828.
16. *Пономаренко В.П.* Формирование сложных колебаний в автогенераторной системе с нелинейной цепью частотного управления // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 5. С. 565.
17. *Пономаренко В.П.* Моделирование эволюции динамических режимов в автогенераторной системе с частотным управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1997. Т. 5, № 5. С. 44.
18. *Пономаренко В.П., Матросов В.В.* Самоорганизация временных структур в мультиравновесной автогенераторной системе с частотным управлением // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 3. С. 1.
19. *Пономаренко В.П., Матросов В.В.* Сложная динамика автогенератора, управляемого петлей частотной автоподстройки с комбинированным дискриминатором // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 9. С. 1125.
20. *Капранов М.В., Романов Е.В.* Линейные модели системы ЧАП с дискриминатором на линии задержки // Радиотехника. 1988. № 11. С. 34.
21. *Капранов М.В.* Связь запаздывания сигнала в волоконно-оптической линии задержки с параметрами каскадно-кольцевых ФАП на границе устойчивости // В кн. Радиотехнические устройства пьезоэлектроники. Омск, 1985.
22. *Каганов В.И.* Радиоэлектронные системы автоматического управления. Компьютеризированный курс: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2009. 432 с.
23. *Заулин И.А., Пономаренко В.П.* Анализ динамических процессов в статических системах синхронизации // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 33, № 1. С. 106.
24. *Заулин И.А., Пономаренко В.П.* Синхронные и автоколебательные режимы в многоустойчивых системах с фазовым управлением // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 4. С. 732.
25. *Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д., Пономаренко В.П.* Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решетках: Учебное пособие. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2007. 188 с.
26. *Томашевский А.И., Капранов М.В.* Регулярные и хаотические колебания в системах автоматической подстройки фазы усилителей // Вестник МЭИ. 1999. № 5. С. 64.
27. *Баутин Н.Н., Леонтович Е.А.* Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1990. 488 с.
28. Динамика нелинейных систем. Программный комплекс для исследования нелинейных динамических систем с непрерывным временем: Учебно-методическая разработка / Сост. В.В. Матросов. Н. Новгород: ННГУ, 2002. 54 с.

29. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. М.: Наука, 1984. 176 с.
30. Пономаренко В.П. Нелинейные эффекты в автогенераторной системе с частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 4. С. 66–84.

Поступила в редакцию 30.01.2014
После доработки 28.04.2014

REGULAR AND CHAOTIC DYNAMICS OF TWO-RING PHASE LOCKED SYSTEM

Part 1

Dynamics of frequency-phase system with identical first-order filters in control circuits

V. P. Ponomarenko

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

We present the results of investigation of dynamical modes in the model of oscillatory system with frequency-phase control using multi-frequency discriminator inversely switched in the chain of frequency control. The study was carried out on the basis of mathematical model of the system with one degree of freedom with the use of qualitative and numerical methods of nonlinear dynamics. It is shown that in such a system may be realized both synchronous and great number of non-synchronous periodic modes. Location parameters domains are established with different dynamic modes of the system. The processes developing in the domain of instability of the synchronous mode are considered.

Keywords: Systems with frequency-phase control, dynamical states, stability, bifurcation, phase portraits, synchronous and non-synchronous modes.

Пономаренко Валерий Павлович – родился в Мурманске (1941), окончил Горьковский университет (1963). С 1968 года работает в Научно-исследовательском институте прикладной математики и кибернетики при Нижегородском университете (НИИ ПМК при ННГУ). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (1972) и доктора физико-математических наук (1993) в области теории синхронизации, теории колебаний и динамики систем. С 1991 года – заместитель директора НИИ ПМК при ННГУ. Область научных интересов – теория колебаний и волн, применение нелинейной динамики в радиоавтоматике, синхронизация автоколебательных систем, математическое моделирование. Один из авторов монографий «Фазовая синхронизация» и «Системы фазовой синхронизации». Опубликовал много научных статей по направлениям, указанным выше.

603005 Н. Новгород, ул. Ульянова, 10
НИИ Прикладной математики и кибернетики ННГУ
E-mail: povp@uic.nnov.ru

