

Проектирование сложных систем фазовой синхронизации

Батура М.П.; Кузнецов А.П.; Шилин Л.Ю.; Шилин Д.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация—Разработан метод проектирования сложных систем фазовой синхронизации (СФС), рассмотрены способы анализа основных структурных элементов систем, определены области параметров проектируемых систем, разработаны методы поиска параметров систем по условию быстродействия и условию шумов в n -мерном пространстве разрабатываемых устройств, предложено использовать режим детерминированного хаоса для засекречивания информации.

Ключевые слова: системы фазовой синхронизации, области качества по быстродействию, области качества по шумам, критерий выбора основных параметров

Современные устройства техники управления, информационных систем, радиолокации и навигации измерительных комплексов невозможно представить без повсеместного применения устройств фазовой синхронизации (УФС). В настоящее время уделяется большое внимание исследованиям в области УФС, что связано с переходом на новые технологии и использованием современной элементной базы [6], [7]. Это привело к повышению рабочих частот, позволило расширить возможности систем фазовой синхронизации, повысить точность и надежность, быстродействие и помехозащищенность, а за счет усложнения режимов работ – создать гибкие алгоритмы обработки информации.

Дискретные устройства фазовой синхронизации (ДУФС) существенно внедрились в область информационных технологий, где используются многокольцевые импульсные и импульсно-цифровые системы частотно-фазовой автоподстройки [1], [2]. Открытие новых режимов работы, и в частности обнаружение NT-периодических режимов [3], режимов детерминированного хаоса позволяет применять УФС для передачи засекреченной информации, использовать их в криптографии [8].

Устройства фазовой синхронизации – нелинейные системы автоматического регулирования с множеством устойчивых состояний равновесия со сложным поведением при различных начальных условиях. Знание областей параметров, в которых система устойчива, при каких параметрах она обладает наилучшим быстродействием, и наилучшими спектральными свойствами выходного сигнала позволяет спроектировать высокоточные и надежные УФС. Но большинство задач по отысканию вышеназванных характеристик, даже применительно к традиционным УФС с фильтрами второго порядка имеют лишь приближенное значение. Поэтому можно сказать, что теория аналоговых устройств фазовой синхронизации сегодня близка к завершению, а теория дискретных устройств, несмотря на большое внимание к ней, развита существенно меньше. В нашей стране

большое влияние на её развитие оказали работы В.П. Кузнецова, М.П. Батуры, А.П. Кузнецова [1], [2], за рубежом работы В.В. Шахгильдяна, Б.И. Шахтарина, М.И. Жодзишского, Д. Джилла, Д. Банерджи, С. Голдмена, Д. Бианчи и др.

Проводя анализ современных методов исследования режимов работы ДУФС, следует отметить наибольший интерес к численным методам, которые выразились в имитационном моделировании процессов в УФС. Особенно привлекает внимание ряд работ А.П. Кузнецова, М.П. Батуры и их учеников, в которых численные методы решения разностных уравнений используются для определения основных характеристик импульсных и цифровых УФС. Известны математически строгие частотные методы, разработанные Г.А. Леоновым. Эти методы позволяют получить области глобальной асимптотической устойчивости исследуемых систем, но интерес на уровне инженерного применения они не вызвали, т.к. дают лишь достаточные условия устойчивости. Большое число работ по исследованию динамики УФС посвящено качественному анализу процессов в фазовом пространстве. Данный метод обеспечивает получение ряда важных для практики общих оценок, касающихся различных режимов функционирования систем, а также оценку поведения системы при изменении исходных параметров. К этому направлению относятся работы С.К. Романова и В.Н. Малиновского [6], Х. Осборна, В.Н. Бельха и Л.В. Лебедевой. Данные методы перспективны, поскольку базируются на положениях теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций, что дает возможность исследовать поведение УФС и проследить качественные изменения в исследуемых устройствах.

Необходимо рассмотреть направление, основанное на использовании стандартного программного обеспечения при анализе динамики УФС. В частности, это работы Д. Банерджи, Д. Бианчи, С. Голдмена, Д.П. Кукина. В этих работах показано, как использовать при анализе УФС пакеты программного обеспечения: SPICE, MATHCAD, SIMETRIX, SIMULINK. С ростом производительности вычислительных машин это направление привлекает всё большее внимание, поскольку позволяет достичь высокую точность анализа, а результаты таких расчетов имеют как теоретический, так и практический интерес.

Таким образом, анализ существующих работ, посвященных методам анализа и синтеза УФС, позволяет сделать вывод о недостаточной полноте публикаций в этой области. Налицо отсутствие точных методов исследования, которые привели бы к возникновению методик расчета динамических режимов, почти полностью отсутствуют работы, посвященные анализу режимов УФС – в частности,

анализу детерминированного хаоса. В результате наблюдается ситуация, когда большая практическая потребность в высокоточных устройствах синхронизации не может быть удовлетворена из-за отсутствия информации о поведении таких систем при произвольных параметрах и условиях. По этой же причине недооцениваются потенциальные возможности УФС.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Авторами проведен анализ структурных схем СФС с различным функциональным назначением. Сделан вывод о наличии двух классов таких систем – класс систем стабилизации (синтезаторы частот, стабилизаторы напряжения и тока) и класс следящих систем (устройств слежения за частотой и фазой входного сигнала, синхронизаторы, регуляторы скорости вращения вала двигателя, устройства передачи, приема и восстановления сигнала). Предложена обобщенная структурная схема систем фазовой синхронизации:

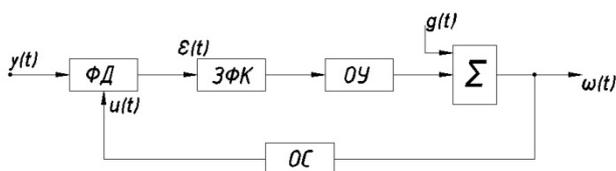


Рис. 1 Обобщенная структурная схема СФС

На рис. 1: ФД – фазовый детектор; ЗФК – звенья фильтрации и коррекции; ОУ – объект управления; ОС – обратная связь; $y(t)$ – входной сигнал; $u(t)$ – сигнал обратной связи; $\varepsilon(t)$ – сигнал ошибки; $g(t)$ – постоянная составляющая выходного сигнала; $\omega(t)$ – выходной сигнал.

Для оценки основных технических характеристик структурных элементов схемы (рис. 1) авторами предложено проводить анализ электрических схем с помощью специализированных программных пакетов OrCAD Capture CIS, SPICE и др. Проведено моделирование фазовых детекторов, управляемых генераторов, фильтров, корректоров и различных делителей, при этом составлена база данных для основных схем, выпускаемых ведущими производителями (MOTOROLA, ON Semiconductor, Philips Semiconductor, НТЦ ДЭЛС и др.).

Авторами предложено математическое описание сложных СФС с аналоговым, импульсным и цифровым управлением. Сделан вывод о возможности создания универсальной математической модели. Для чего в схемах этих устройств выделяется одинаковые, с точки зрения математического описания, блоки: непрерывная часть, состоящая из звеньев фильтрации и коррекции, и объекта управления; цепи обратной связи. Основным изменяющимся блоком является фазовый детектор. Именно этот блок определяет, каким будет устройство – аналоговым, импульсным или цифровым; так же он определяет вид модуляции, играет большую роль при выборе шага моделирования при расчете переходных процессов.

Таким образом, неизменными остаются уравнения состояния, описывающие звенья фильтрации и коррекции, система уравнений разомкнутого устройства фазовой синхронизации:

$$x(t) = \Phi(t - t_n)x(t_n) + \int_{t_n}^t \Phi(t - \lambda)B\varepsilon(t)d\lambda, \quad (1)$$

где $\Phi(t)$ – переходная матрица состояния системы; $x(t)$ – вектор состояния, при $t = t_n$ и $t = t_{n1}$ соответственно $x(t_n)$ и $x(t_{n1})$; B – числовая матрица размерности $m \times 1$ метода переменных состояния; λ – параметр интегрирования.

Далее необходимо выбрать вид фазового детектора, что определит соответствующее математическое описание:

- для аналоговых СФС, в зависимости от выбранного детектора, задается соответствующая аналитическая зависимость;
- для импульсных СФС в случае совместной амплитудно-, широтно- и частотно-импульсной модуляции (АИМ – ШИМ – ЧИМ) уравнения сравнивающего устройства имеют вид:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} h_n, t \in [t_n; t_n + \tau_n] \\ -h_n, t \in [t_n + \tau_n; t_{n+1}] \end{cases} \quad (2)$$

Здесь описана двумерная модуляция второго рода, h_n – амплитуда воздействующего импульса на n -такте квантования; t_n – момент появления импульса положительной полярности (начало отсчета на заданном шаге); $T_n = t_{n+1} - t_n$ – длительность периода на n шаге.

- Для цифровых СФС при заданном виде дискриминационной характеристики фазового детектора алгоритм моделирования следующий:

1. Определяются разрешенные значения цифровых отсчетов сигнала рассогласования:

$$\Delta\varphi_n = \frac{2\pi}{L},$$

где $\Delta\varphi_n$ – фазовое рассогласование на n шаге моделирования; L – разрядность преобразователя АЦП.

2. Определяется амплитудные значения сигнала рассогласования:

$$h = h_{max} \sin(\varphi_0 + \varphi_n), \quad (3)$$

где h – текущее неразрешенное значение сигнала рассогласования; h_{max} – максимальное значение сигнала рассогласования; φ_0 – значение начальной фазы выходного сигнала на предыдущем шаге; φ_n – набег фазы на n шаге расчета.

3. Нахождение разрешенного значения сигнала рассогласования h_n :

$$\text{если } h_i \geq h \geq h_{i+1}, \quad (4)$$

то $h_n = h_i$,

где h_i, h_{i+1} – разрешенные значения сигнала рассогласования, определяющиеся разрядностью преобразователя АЦП и видом дискриминационной характеристики.

Следующим шагом, после выбора фазового детектора, является описание уравнения замыкания, которое в общем виде описывается:

$$\int_{t_0}^{t_{nk}} \omega(t) dt = 2\pi N_{oc} \quad (5)$$

Уравнение (5) для универсальной модели решается на интервале времени $t \in [t_0; t_m]$, при этом весь интервал разбивается на различное количество шагов решения:

- Для аналоговых СФС количество шагов решения определяется исходя из требуемой точности (от 3–6 шагов – погрешность 10%, до 100 шагов – погрешность не более 1%);
- Для импульсных СФС количество шагов составляет 1–2 шага, при этом погрешность не более 3%;
- Для цифровых СФС количество шагов различно и определяется частотой стробирования фазового детектора f_c , что составляет не менее 20 шагов и погрешность не более 2%.

Для всех устройств определяется набег фазы выходного сигнала:

$$\varphi_n = \frac{1}{N_{oc}} \int_{nT}^{nT+\Delta t_n} \omega(t) dt, \quad (6)$$

где Δt_n - интервал времени, на котором происходит расчет φ_n ; определяется исходя из величины шага решения.

В результате получена модель, которая описывается СФС с любым видом модуляции.

Предположенная модель может дорабатываться на основе математического описания фазовых детекторов иного типа с различным видом фазовых характеристик и дополнительными функциональными свойствами.

Описание новых блоков фазовых детекторов, объектов управления может производиться аналитически, задаваться алгоритмическими схемами или таблицами.

К недостаткам такой модели можно отнести то факт, что при требовании высокой точности расчета, больших постоянных времени звеньев фильтрации и высокой частоте стробирования, модель использует большие временные и вычислительные ресурсы. Для устранения этого недостатка автор предлагает использовать аналитическое решение для типовых звеньев фильтрации, поскольку расчет полученных формул позволяет наряду с высокой точностью затрачивать небольшие расчетные ресурсы. Неудобством подобного подхода является необходимость создания библиотеки для наиболее распространенных звеньев.

Сочетание имитационного моделирования и моделирования на основе аналитического описания позволило создать универсальную модель устройств фазовой синхронизации, которая наряду с требуемой (заранее задаваемой) точностью расчета, отличается высокой эффективностью, быстродействием и позволяет, в случае необходимости, дорабатывать модель в соответствии с требованиями разработчика.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СФС

Авторами определены области устойчивости СФС в параметрах проектируемых систем на основе анализа устойчивости “в малом”. Такой подход оправдан тем, что полученные области используются для стартового анализа и точность определения исходных параметров не влияет на конечный результат. Выбранные параметры используются для построения многомерных областей качества по быстродействию в параметрах проектируемых систем. На рис. 2 приведен пример построения трехмерной области.

Таким же образом строятся многомерные области качества по шумам (рис 3).

Составление областей качества рис. 2 и рис. 3 позволяет произвести выбор параметров проектируемого устройства по заданному критерию отбора [3].

Таким образом, авторами разработан метод параметрического синтеза СФС, основанный на моделировании областей качества по быстродействию и по уровню шумов с последующим выбором основных параметров. Проектирование осуществляется для аналоговых, импульсных или цифровых систем фазовой синхронизации.

- [1] А.П. Кузнецов, М.П. Батура, Л.Ю. Шилин. Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. Мн.: Наука і тэхніка, 1993. – 224 с
- [2] М.П. Батура. Дискретные системы с фазовым управлением / М.П. Батура, - Минск: БГУИР, 2002. – 152 с
- [3] Л.Ю. Шилин. Анализ режимов работы импульсных систем фазовой синхронизации / Л.Ю. Шилин, Д.Л. Шилин // Доклады БГУИР, 2008. - №1, - с. 22-28
- [4] И.М. Соболев, Р.Б. Статников. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа. 2-е издание. 2006. – 175 с
- [5] М.П. Батура. Статистическая динамика дискретных систем с фазовым управлением / М.П. Батура // Известия Белорусской инженерной академии – 2002. - №1 (13). – с. 33-37
- [6] Романов С.К., Тихомиров Н.М, Леншин А.В. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот. – М.: Радио и связь, 2010. – 328 с
- [7] Белов Л. Компоненты синтезаторов стабильной частоты. Генераторы управляемые напряжением. – М.: Электроника: НТБ, 2004, №4. – с. 42-46
- [8] Giovanni Bianchi. Phase Locked Loop Synthesizer Simulation. New York, 2005. – 237 с.

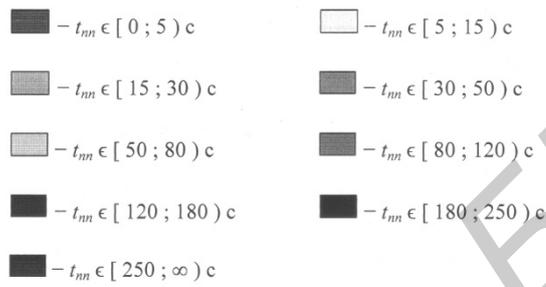
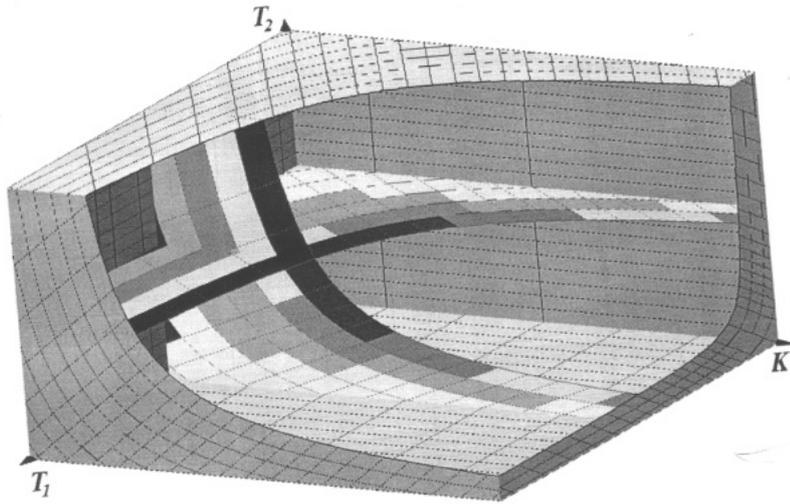


Рис. 2. Область качества по быстродействию.
Время переходного процесса t_{nn}

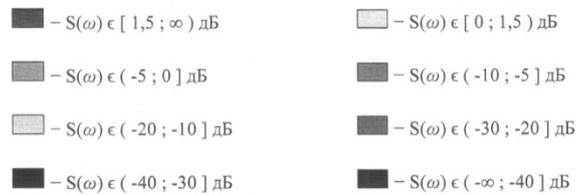
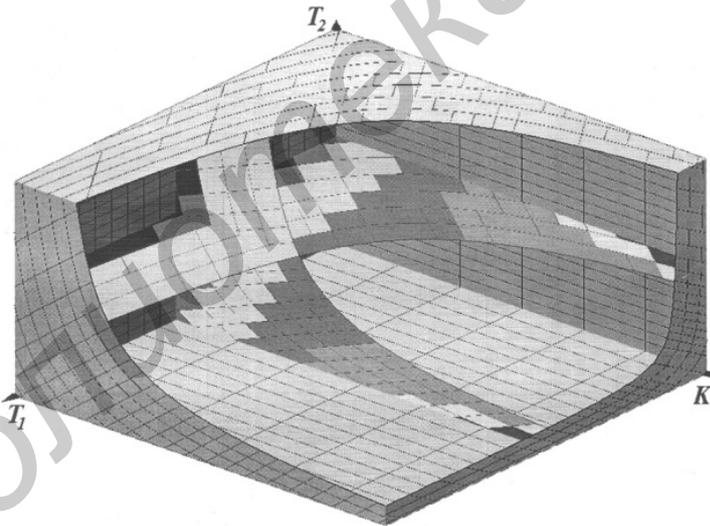


Рис. 3. Области качества по уровню шумов.

Отношение сигнал/шум: $SNR(\omega) = 20 \lg \left(\frac{g(\omega)}{f(\omega)} \right) + S(\omega)$