

МОДЕЛИ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. КУЗНЕЦОВ А. П., асп. АЛЪКАТАУНА Х. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Вопросы моделирования переходных процессов в дискретных системах с фазовым управлением (ДСФУ) остаются в числе актуальных задач автоматики, радиофизики, теоретической радиотехники. Эти малогабаритные, простые по структуре, надежные, высокоточные устройства фазовой синхронизации частоты и скорости [1], построенные на принципе управления по отклонению фаз, используются для стабилизации частоты генераторов скорости двигателей, в стабилизаторах напряжения и радиотехнике для демодуляции сигналов с частотной и фазовой модуляцией, для синтеза частот, в СВЧ генераторах, измерительных приборах и т. д. [2–4].

Общая структура ДСФУ представлена на рис. 1.

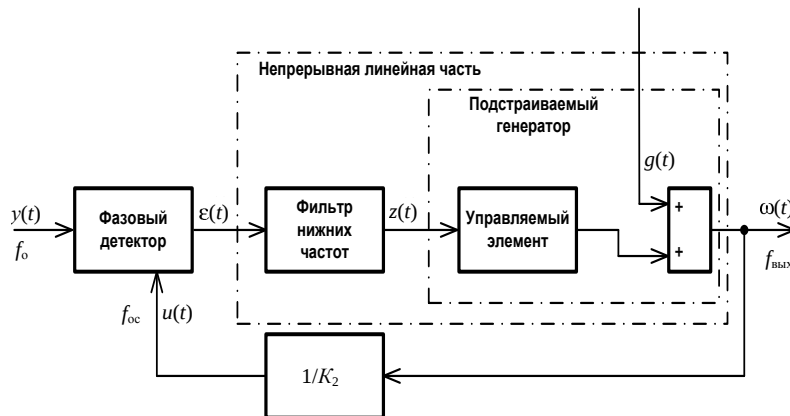


Рис. 1. Структурная схема ДСФУ

К достоинствам ДСФУ следует отнести высокий КПД, малые габариты и массу, способность работать на высоких частотах квантования, простоту исполнения. Основной проблемой при проектировании дискретных систем с фазовым управлением является обеспечение устойчивости, хороших динамических и статистических характеристик.

Известны методы моделирования ДСФУ непосредственно по нелинейным математическим моделям, представленным разностными уравнениями [2], а также с помощью пакета Matlab [2]. Причем первые методы имеют малую гибкость, а моделирование с помощью пакета Matlab не всегда удастся осуществить, поскольку имеются блоки, не предусмотренные этим пакетом.

Цель настоящей статьи – моделирование дискретных систем с фазовым управлением с представлением основных блоков ДСФУ в виде простейших уравнений. Такой метод моделирования обладает достаточной гибкостью, быстродействием и точностью. Из-за существенной нелинейности ДСФУ анализ и синтез таких систем представляют собой сложную задачу [1].

Роль фазового детектора (ФД) заключается в формировании сигнала ошибки $\varepsilon(t)$. В зависимости от принципа формирования сигнала ошибки различают типы фазовых детекторов. В данной статье будем рассматривать систему на базе простейшего фазового детектора триггерного типа. Временные диаграммы, описывающие принцип его работы, представлены на рис. 2.

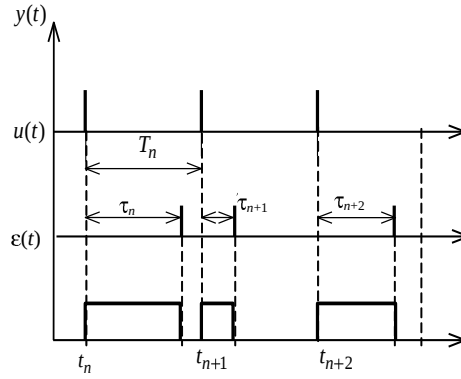


Рис. 2. Временные диаграммы работы фазового детектора триггерного типа

Сигнал ошибки $\varepsilon(t)$ формируется на основе сравнения фаз входного $y(t)$ и выходного $\omega(t)$ сигналов. В качестве задающего воздействия $y(t)$ используется последовательность импульсов с высокостабильного опорного генератора (ОГ).

Для сравнения в цепи обратной связи (ОС) происходит преобразование сигнала с выхода $\omega(t)$ в последовательность импульсов $u(t)$ с частотой $f_{\text{вых}}/K_2$, где K_2 – коэффициент деления цепи ОС.

С выхода ФД сигнал рассогласования $\varepsilon(t)$, являющийся последовательностью широтно-частотно-модулированных импульсов (ШЧИМ), поступает через фильтр нижних частот (ФНЧ) на управляемый элемент (УЭ) подстраиваемого генератора (ПГ) или электродвигатель и т. д. В [2] получены точные нелинейно-разностные уравнения систем для разных типов сравнивающих устройств. Так, для системы с фазовым детектором триггерного типа полученные выражения имеют вид:

$$X_{n+1} = e^{AT_n} X_n + A^{-1} e^{AT_n} (E - e^{-A\tau_n}) Bh; \quad (1)$$

$$C A^{-1} [e^{A T_n + \tau_{n+1}} - e^{A\tau_n}] X_n + A^{-2} [e^{A T_n + \tau_{n+1}} - e^{A T_n + \tau_{n+1} - \tau_n} - e^{A\tau_n} + e^{A\tau_{n+1}}] Bh - A^{-1} \tau_{n+1} Bh + Dh \tau_{n+1} + g_n (T_n - \tau_{n+1}) + g_{n+1} \tau_{n+1} = 2\pi/K_2, \quad (2)$$

где A , B , C , D – описание непрерывной линейной части (НЛЧ) в форме матриц уравнений в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + B\varepsilon(t); \\ z(t) = CX(t) + D\varepsilon(t), \end{cases} \quad (3)$$

X_n , X_{n+1} – векторы состояния системы на моменты прихода n -го и $(n+1)$ -го импульсов с ОГ соответственно; E – единичная матрица; K_2 – коэффициент передачи цепи обратной связи; g_n , g_{n+1} – собственная нестабилизированная

частота ПГ на моменты прихода n -го и $(n + 1)$ -го импульсов с ОГ соответственно; τ_n, τ_{n+1} – расстояние между импульсом с ОГ и импульсом из цепи ОС на n -м и $(n + 1)$ -м периоде интегрирования соответственно.

Выражения были получены путем рассмотрения реакции НЛЧ на изменение уровня входного сигнала с ФД в моменты прихода импульсов ОС с последующим замыканием через закон интегральной ШИМ

$$K_2 \int_{t_n + \tau_n}^{t_n + T_n + \tau_{n+1}} [Z(t) + g(t)] dt = 2\pi, \quad (4)$$

где

$$K_2[Z(t) + g(t)] = u(t).$$

Эти выражения являются точным описанием системы. Обратим внимание на (2). Для большей наглядности перепишем его в виде

$$Q_1 + Q_2 \tau_{n+1} + Q_3 e^{Q_4 \tau_{n+1}} = 0, \quad (5)$$

где

$$Q_1 = -C e^{A \tau_n} (X_n A^{-1} + B h A^{-2}) + g_n (T_n - \tau_n) - \frac{2\pi}{K_2};$$

$$Q_2 = -C B h A^{-1} + D h + g_{n+1};$$

$$Q_3 = C(e^{A T_n} (X_n A^{-1} + B h A^{-2} (1 - e^{-A \tau_n})) + A^{-2} B h);$$

$$Q_4 = A.$$

Это тот случай, когда получить аналитическое решение уравнения невозможно. Уравнение (5) является трансцендентным относительно переменной τ_{n+1} . Если не требуется большая точность вычислений и желательна высокая скорость счета, то можно прибегнуть к линеаризации этих уравнений относительно установившегося режима. Так, для системы с ФД триггерного типа и НЛЧ с передаточной функцией вида

$$W(p) = K_1(T_2 p + 1)/(T_1 p + 1)$$

координаты установившегося режима определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \tau^* = \frac{2\pi}{K_1 K_2 h} - \frac{g^* T^*}{K_1 h}; \\ x^* = \frac{K_1 h (1 - T_2 / T_1) (e^{\tau^* / T_1} - 1)}{e^{T^* / T_1} - 1}; \\ z^* = x^* + D h = x^* + K_1 T_2 h / T_1. \end{cases} \quad (6)$$

Линеаризованное разностное уравнение (1) имеет вид

$$\Delta x_{n+1} = e^{-T^* / T_1} \Delta x_n + \frac{K_1}{T_1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) h e^{\frac{-(T^* - \tau^*)}{T_1}} \Delta \tau_n + h \frac{K_1}{K_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{1 - e^{\tau^* / T_1}}{e^{T^* / T_1} - 1} \Delta T_n, \quad (7)$$

а линеаризованное уравнение замыкания цепи обратной связи (2)

$$\Delta\tau_{n+1} = A_{21}\Delta X_n + a_{22}\Delta\tau_n + b_{21}\Delta T_n + c_{21}\Delta g_n + c_{22}\Delta g_{n+1}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A_{21} &= \frac{T_1 \left[e^{\frac{-(T^* + \tau^*)}{T_1}} - e^{-\tau^*/T_1} \right]}{\gamma_0}; \\ a_{22} &= -\frac{1}{\gamma_0} \left[\frac{K_1 h \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \left(2 - e^{\frac{T^* - \tau^*}{T_1}} - e^{-T^*/T_1} \right)}{1 - e^{T^*/T_1}} - g^* \right]; \\ b_{21} &= -\frac{1}{\gamma_0} \left[\frac{K_1 h \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (1 - e^{-\tau^*/T_1})}{e^{T^*/T_1} - 1} + g^* \right]; \\ c_{21} &= \frac{\tau^* - T^*}{\gamma_0}; \quad c_{22} = \frac{\tau^*}{\gamma_0}; \\ \gamma_0 &= \frac{K_1 h \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (1 - e^{-\tau^*/T_1})}{1 - e^{-T^*/T_1}} + \frac{K_1 T_2 h}{T_1} + g^*. \end{aligned}$$

Уравнения (7), (8) уже линейны и позволяют рекуррентно строить переходные процессы, а также осуществлять анализ устойчивости и других характеристик системы. Но, как уже говорилось, точность результатов невысокая и выражения справедливы только для режима малых отклонений от стационарных значений переменных.

Получить более точные значения можно, если не прибегать к линеаризации уравнений (1), (2), а подойти к ним с позиций численных методов. Используя даже простейшие из методов решения уравнений, такие как метод золотого сечения или деления отрезка пополам, можно получить результаты любой заданной точности и для любых режимов работы. Тогда построение переходного процесса происходит путем рекуррентного обращения к (1), (2). При известных X_n и τ_n по (1) вычисляется X_{n+1} , а по (2) — τ_{n+1} и т. д., пока процесс не установился или не достигнуто заданное время моделирования.

Такие подходы, основанные на рассмотрении приведенных аналитических выражений, обеспечивают наибольшие быстродействие и точность, но чрезвычайно малую гибкость. Выражения строго привязаны к структуре системы, и любые изменения (например, изменился тип ФД) требуют полного пересмотра всей модели.

С точки зрения гибкости и универсальности, более интересными являются имитационные типы моделей. Такие модели, построенные по модульному принципу, позволяют рассчитывать протекающие процессы в ДСФУ во временной области, производить замену сравнивающих устройств, осуществлять вывод значений любых переменных величин в произвольные моменты времени. И что главное, внесение каких-либо изме-

нений потребует пересмотра только отдельной функции (модуля), а не всей программы (модели) в целом.

При построении имитационной модели рассматривается не вся система в целом, а каждый составляющий ее элемент в отдельности. Любой элемент может быть представлен в виде алгоритма или простейшего аналитического выражения с определенным набором входных и выходных параметров. В итоге объект моделирования приобретает вид графа или системы из n уравнений, где n – количество узлов (элементов объекта моделирования).

Для ДСФУ расчет всех элементов модели происходит одновременно. Шаг дискретизации определяется «решателями дифференциальных уравнений (ДУ)» инерционных звеньев (в нашем случае таким звеном является модуль непрерывной линейной части). Под понятием «решатель ДУ» подразумевается применяемый численный алгоритм решения систем дифференциальных уравнений. В зависимости от специфики системы и выбранного метода шаг дифференцирования может быть постоянным либо переменным. На каждом шаге происходит предоставление информации о состоянии входов и выходов пользователю. В эти же моменты можно производить изменение отдельных параметров или целых модулей. Это предоставляет широкие возможности для анализа и изучения ДСФУ и является главным достоинством имитационного типа моделей (рис. 3).

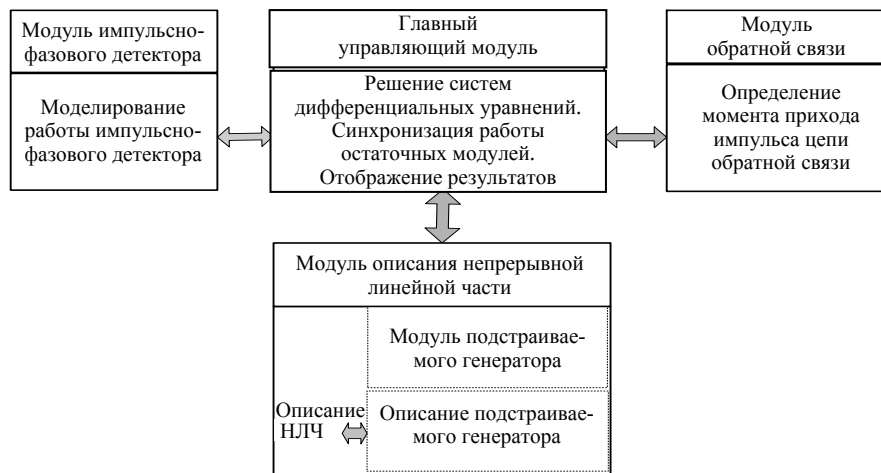


Рис. 3. Взаимодействие модулей имитационной модели ДСФУ

Для рассматриваемой в рамках данной статьи ДСФУ вид графа в целом идентичен рис. 1, а система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \omega_{\text{вых}}(t) = f_{\text{ПГ}}(g(t), z(t)); \\ z(t) = f_{\text{НЛЧ}}(\varepsilon(t), t); \\ \varepsilon(t) = f_{\text{ИФД}}(y(t), u(t)); \\ u(t) = f_{\text{ОС}}(\omega_{\text{вых}}(t)), \end{cases} \quad (9)$$

где $f_{\text{ПГ}}(g(t), z(t))$ – модуль подстраиваемого генератора. В простейшем случае может быть представлен функцией вида $f_{\text{ПГ}} = g(t) + K_{\text{ген}}z(t)$; $f_{\text{НЛЧ}}(\varepsilon(t), t)$ – модуль непрерывной линейной части ДСФУ. В его рамках происходит решение системы ДУ вида (3) на текущем интервале интегри-

рования; $f_{\text{ИФД}}(y(t), u(t))$ – модуль фазового детектора. Работа любого типа сравнивающего устройства в принципе может быть представлена достаточно простым алгоритмом. На основе информации о сигналах на входе $y(t)$ и $u(t)$ вырабатывается сигнал на выходе в текущий момент времени t ; $f_{\text{ОС}}(\omega_{\text{вых}}(t))$ – модуль обратной связи; определяет момент прихода импульса на вход ИФД, реализуется обычно посредством алгоритма, основанного на выражении (4).

Расчет всех элементов модели происходит одновременно. Шаг дискретизации определяется «решателями ДУ» инерционных звеньев (в нашем случае таким звеном является модуль НЛЧ). Под понятием «решатель ДУ» подразумевается применяемый численный алгоритм решения систем дифференциальных уравнений. В зависимости от специфики системы и выбранного метода шаг дифференцирования может быть постоянным либо переменным. На каждом шаге происходит предоставление информации о состоянии входов и выходов пользователю. В эти же моменты можно производить изменение отдельных параметров или целых модулей. Это предоставляет широкие возможности для анализа и изучения ДСФУ и является главным достоинством имитационного типа моделей.

Для автоматизации решения задач синтеза ДСФУ было разработано программное обеспечение (ПО) макропроектирования систем с фазовым управлением [2]. Принцип работы строится на предварительном выборе параметров ДСФУ по линеаризованной модели с последующим уточнением по нелинейной.

В базу данных ПО уже входят модели и принципиальные электрические схемы типовых узлов систем с фазовым управлением: сравнивающих устройств, операционных усилителей, фильтров, генераторов, делителей и т. п. Есть возможность подключения библиотек описания новых устройств.

Проектирование начинается с выбора структурной схемы системы и задания разработчиком начальных значений параметров: коэффициентов передачи и постоянных времени основных блоков. Затем производится построение в плоскости двух параметров системы областей синхронизации, устойчивости, качества по быстродействию и шумам. Пользователь имеет возможность выбора более удобной для восприятия формы графического предоставления информации.

ПО разработано в среде Visual Studio 6.0 с применением динамических библиотек пакета автоматизации инженерных расчетов, получены переходные процессы отдельных звеньев системы (рис. 1а, б).

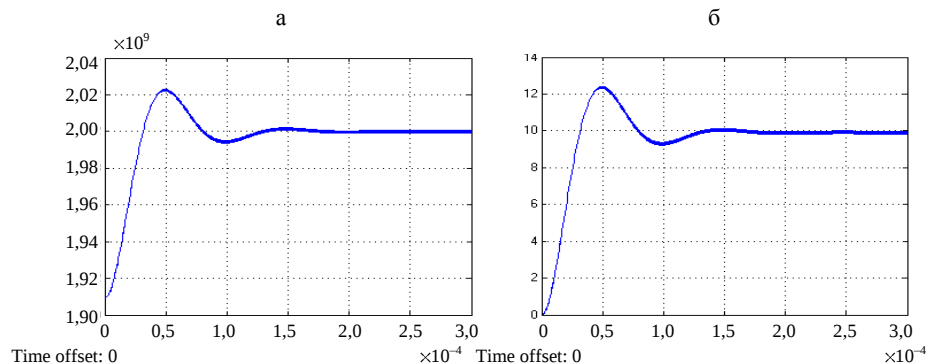


Рис. 4. Переходные процессы: а – ПГ; б – ФНЧ

ВЫВОД

При анализе и синтезе дискретных систем с фазовым управлением ДСФУ для приблизительных оценок удобнее использовать линеаризованные модели, построенные на основе выражений вида (1), (2), а уточнение результатов следует производить по имитационной модели. При построении последней рассматривается не вся система в целом, а каждый составляющий ее элемент в отдельности, а затем устанавливается связь между элементами, что приводит к получению полной модели системы в целом. Таким образом удастся сэкономить время и удовлетворить требованиям, предъявленным к точности расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г а л и н, А. С. Диапазон-кварцовая стабилизация СВЧ / А. С. Галин. – М.: Связь, 1976.
2. Б а т у р а, М. П. Дискретные системы с фазовым управлением / М. П. Батура. – Минск: БГУИР, 2002.
3. С т е к л о в, В. К. Итерационные системы фазовой автоподстройки / В. К. Стеклов, В. В. Коробко. – Киев: Техника, 2004.
4. К у з н е ц о в, В. П. Анализ переходных режимов в электроприводе с широтно-импульсным управлением / В. П. Кузнецов, Я. И. Онацкий, А. В. Марков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1975. – № 8.

Представлена кафедрой
систем управления

Поступила 22.02.2007

УДК 621.31.019.3

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СООРУЖЕНИЯ ПАРОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Асп. СТАРЖИНСКИЙ А. Л.

Белорусский национальный технический университет

Необходимость в сооружении собственной электростанции на промышленном предприятии в условиях Республики Беларусь возникает по следующим причинам [1]:

- из-за потребности технологического процесса в тепловой энергии;
- для обеспечения резервного питания ответственных потребителей;
- из-за высоких тарифов на тепловую и электрическую энергию и др.

В настоящее время отмеченные причины дополняются также необходимостью экономии энергоресурсов в тех случаях, когда не в полной мере используется потенциал вырабатываемого пара высокого давления и тем-