

Проектирование систем фазовой синхронизации

Шилин Д.Л.; Пучинец В.В.; Шилин Л.Ю.

Кафедра ТОЭ, ФИТиУ

Белорусский государственный университет информатики и электроники

Минск, Республика Беларусь

e-mail: puchinets.viktor@yandex.ru

Аннотация — В данной работе рассматривается процесс проектирования систем фазовой синхронизации

Ключевые слова: системы фазовой синхронизации; устойчивость; быстродействие; отношение сигнал/шум

Системы фазовой синхронизации (СФС) широко используются в радиотехнике, телекоммуникациях и компьютерной технике, что обусловлено их высокой точностью, скоростью, простотой технической реализации, работой в широком диапазоне частот. Сложность математического описания и моделирования СФС объясняется тем, что рассматриваемые системы относятся к классу нелинейных систем автоматического регулирования, а также имеют множество режимов работы: синхронизма, удержания, захвата, биений, NT-периодический, работа на кратных частотах, детерминированный хаос [1].

На рис.1 изображена обобщенная схема системы фазовой синхронизации, где ФД – фазовый детектор, ЗФК – звенья фильтрации и коррекции, УГ – управляемый генератор, ОС – цепь обратной связи, y – задающее воздействие, ε – ошибка регулирования, ω – сигнал на выходе СФС, f_1 и f_2 – возмущающее воздействие.

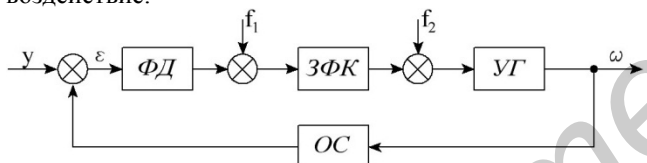


Рис. 1. Обобщенная схема СФС

$W_1(p)$ – передаточная функция ФД, $W_2(p)$ – передаточная функция ЗФК, $W_3(p)$ – передаточная функция УГ

При проектировании СФС возникает задача определения параметров разрабатываемого устройства, удовлетворяющих требованиям технического задания.

Предлагаемый метод проектирования СФС основан на построении многомерных областей устойчивости, многомерных областей качества по времени переходных процессов, многомерных областей качества по уровню шумов с последующим выбором параметров разрабатываемой системы, удовлетворяющим условиям технического задания.

Для примера предлагается рассмотреть линейную СФС с RC фильтром. Передаточные функции данной системы имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \quad \text{– передаточная функция ФД}$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1} \quad \text{– передаточная функция ЗФК}$$

$$W_3(p) = \frac{k_3}{p} \quad \text{– передаточная функция УГ}$$

Для построения областей устойчивости воспользуемся критерием Михайлова. Так как постоянных времени системы две, следовательно, область устойчивости будет трехмерной.

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W(p) = \frac{K}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

где $K = k_1 k_2 k_3$

Найдем характеристическое уравнение системы:

$$p^3 T_1 T_2 + p^2 (T_1 + T_2) + p + K = 0$$

Заменив p на $j\omega$ получим:

$$-j\omega^3 T_1 T_2 - \omega^2 (T_1 + T_2) + j\omega + K = 0$$

Действительную часть обозначим через X , мнимую через Y . Приравняв X и Y к 0, получим уравнения, определяющие границу устойчивости:

$$X = -\omega^2 (T_1 + T_2) + K = 0$$

$$Y = -\omega^3 T_1 T_2 + \omega = 0$$

Далее находим уравнения проекций границы области устойчивости на плоскости T_1-0-K , T_2-0-K и T_1-0-T_2

Для плоскости T_1-0-K получаем:

$$T_1(\omega, T_2) = \frac{1}{T_2 \cdot \omega^2} K(\omega, T_2) = T_2 \cdot \omega^2 + \frac{1}{T_2}$$

Определяем значения функций при $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$:

$$\omega \rightarrow 0 \quad T_1 \rightarrow \infty \quad K \rightarrow \frac{1}{T_2}$$

$$\omega \rightarrow \infty \quad T_1 \rightarrow 0 \quad K \rightarrow \infty$$

Находим знак определителя:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{d}{dT_1} X & \frac{d}{dK} X \\ \frac{d}{dT_1} Y & \frac{d}{dK} Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\omega^2 & 1 \\ -\omega^3 T_2 & 0 \end{vmatrix} = \omega^3 T_2 > 0$$

Согласно критерию Михайлова, если $\Delta > 0$, то область находится слева от границы устойчивости, при изменении ω от 0 до ∞ . Если $\Delta < 0$, то область находится справа от границы устойчивости.

Проекция области устойчивости на плоскость T_1-0-K изображена на рис. 2.

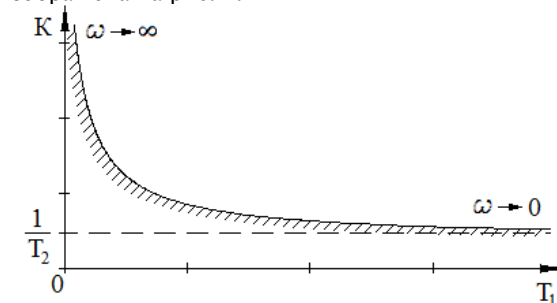


Рис.2. Проекция области устойчивости на плоскость T_1-0-K

Аналогичные действия проводим для плоскостей T_2-0-K и T_1-0-T_2 .

В результате получим область устойчивости, изображенную на рис. 3.

Система устойчива, если параметры T_1 , T_2 и K находятся между плоскостями А, В, С, T_1-0-T_2 , T_1-0-K и $K-0-T_2$.

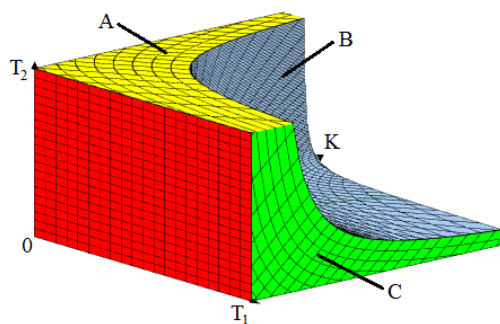


Рис. 3. Область устойчивости СФС

При проектировании СФС необходимо произвести выбор параметров системы из условия обеспечения устойчивости и быстродействия. Для этого определим области быстродействия СФС. В основу положено нахождение длительности переходных процессов протекающих в системе.

Длительность переходных процессов в системе оценивается следующим образом:

$$\tau_{\text{пн}} \approx (3..5) \cdot \frac{1}{|p|}$$

Для наглядности в области устойчивости были построены плоскости, на которых изображено в условных единицах время переходного процесса (рис. 4). В процессе проектирования можно строить необходимое для выбора оптимальных параметров количество данных плоскостей.

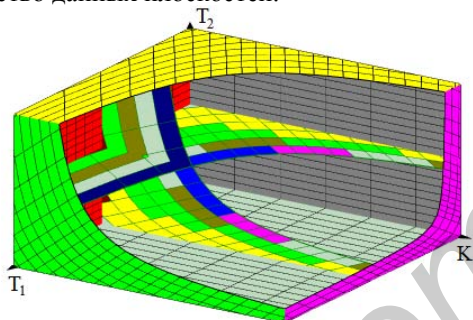


Рис. 4. Области качества по быстродействию

- Время переходного процесса $t_{\text{пн}}$:
- $t_{\text{пн}} \in [0; 5] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [6; 15] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [16; 30] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [31; 50] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [51; 80] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [81; 120] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [121; 180] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [180; 250] \text{ с}$
 - $t_{\text{пн}} \in [251; \infty) \text{ с}$

В качестве параметра определяющего уровень шумов выберем отношение сигнал/шум на выходе устройства.

Для нахождения данного отношения воспользуемся следующим методом [3]:

Найдем уровень шума на выходе устройства:

$$f_{\text{out}}(p) = f_1(p) \cdot \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_3}{p} + f_2(p) \cdot \frac{k_3}{p}$$

Полезный сигнал на выходе системы имеет вид:

$$y_{\text{out}}(p) = y(p) \cdot \frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_3}{p}$$

Тогда отношение сигнал/шум на выходе системы:

$$\text{SNR}(p) = \frac{g(p) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)} \cdot \frac{f_1(p) \cdot k_2 \cdot k_3 + f_2(p) \cdot k_3 \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_2 \cdot p + 1)}$$

Для упрощения расчетов положим $k_1 = K$, $k_2 = 1$, $k_3 = 1$, $f(p) = f_1(p) = f_2(p)$, тогда:

$$\text{SNR}(p) = \frac{g(p)}{f(p)} \cdot \frac{K}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 2)}$$

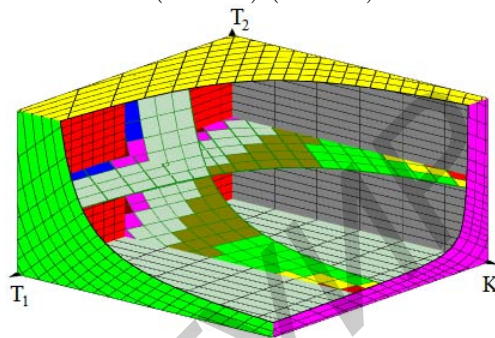


Рис. 5. Области качества по уровню шумов

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

- $S \in [1,5; \infty) \text{ дБ}$
- $S \in [0; 1,5] \text{ дБ}$
- $S \in [-5; 0] \text{ дБ}$
- $S \in [-10; -5] \text{ дБ}$
- $S \in [-20; -10] \text{ дБ}$
- $S \in [-30; -20] \text{ дБ}$
- $S \in [-40; -30] \text{ дБ}$
- $S \in (-\infty; -40] \text{ дБ}$

На основании построенных областей (рис. 3 – 5) выбираем оптимальные параметры СФС согласно требованиям технического задания

Так как для построения областей устойчивости, определения времени переходных процессов и отношения сигнал/шум мы использовали линеаризованную СФС, границы построенных областей могут быть искажены. Поэтому впоследствии необходимо проверить соответствие системы с параметрами из выбранной области, заданным требованиям цифровым моделированием на высокоточной модели [4].

Если параметры системы удовлетворяют заданным требованиям, то процесс моделирования окончен. В противном случае необходимо повторить моделирование для иных параметров из выбранной области.

Таким образом, авторами предлагается система разработки устройств фазовой синхронизации по условиям технического задания. Проектирование может быть проведено для аналоговых, импульсных и цифровых СФС.

[1] Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. Москва, Связь, 1972

[2] Шилин Л.Ю., Шилин Д.Л. Анализ режимов работы импульсных систем фазовой синхронизации

[3] Giovanni Bianchi. Phase Locked Loop Synthesizer Simulation

[4] Кузнецов А. П., Барура М. П., Шилин Л. Ю. Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением