

СИНТЕЗ ФИЛЬТРУЮЩЕ-КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Докт. техн. наук ШИЛИН Л. Ю., инж. ДЕРЮШЕВ А. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В настоящее время в энергетике самое широкое применение находят импульсные устройства фазовой синхронизации (ИУФС), используемые как высококачественные стабилизаторы напряжения, регуляторы частоты вращения электродвигателей, устройства синхронизации в системах передачи телеметрической информации. Фильтрующе-корректирующие звенья (ФКЗ) являются неотъемлемой частью ИУФС, обеспечивающей требуемые характеристики устройства в целом. Для удовлетворения противоречивых требований к качественным показателям ИУФС в установленном режиме и длительности переходных процессов наметилась тенденция к использованию ФКЗ с изменяемой передаточной функцией (ФКЗИ) [1], однако широкое применение таких звеньев сдерживается отсутствием отработанной методики их синтеза. Авторами предлагается подход к синтезу таких звеньев.

Типичная передаточная функция ФКЗ ИУФС может быть представлена в виде [2]

$$W(p) = \frac{\prod_{j=n}^{m+n} (1 + pT_j)}{\prod_{i=1}^n (1 + pT_i)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + 1}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + 1}. \quad (1)$$

Исходя из того, что нули и полюса передаточной функции (1) являются вещественными, а $m \leq n$, электрическая схема ФКЗ может быть реализована в виде каскадного соединения интегрирующих (рис. 1а) и пропорционально-интегрирующих (рис. 1б) звеньев.

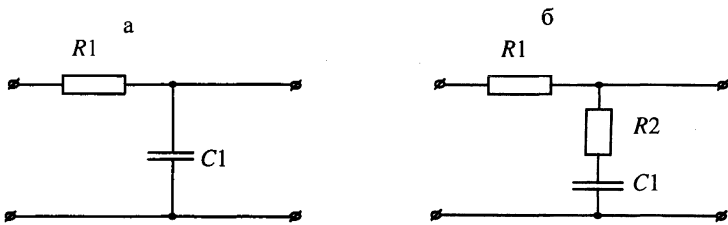


Рис. 1

Передаточные функции этих звеньев соответственно равны:

$$W_u(p) = \frac{1}{1 + pT1} = \frac{1}{1 + pR1C1}; \quad (2.1)$$

$$W_{nu}(p) = \frac{1 + pT_2}{1 + pT_1} = \frac{1 + pR_2C_1}{1 + pC_1(R_1 + R_2)}. \quad (2.2)$$

Для сокращения длительности переходных процессов необходимо уменьшить постоянные времени знаменателя передаточной функции (1) в то время, когда велико рассогласование между опорным сигналом и управляемой величиной. Это достигается введением ключа S1, замыкающего один из резисторов ФКЗИ под действием управляющего напряжения; эквивалентная схема при включении ключа в интегрирующее звено приведена на рис. 2.

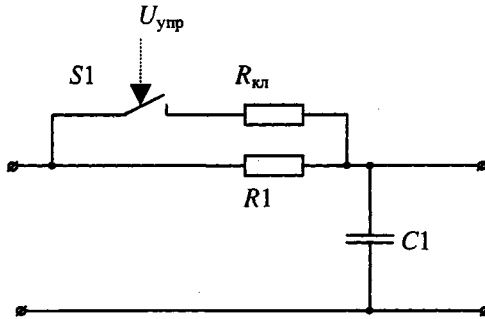


Рис. 2

Отметим, что в качестве ключевого элемента иногда используется встречное параллельное включение двух диодов.

Синтез желаемых передаточных функций ФКЗИ при открытом $W_o(p)$ и закрытом $W_3(p)$ положениях ключа проводится при макропроектировании ИУФС и может осуществляться по методике, изложенной в [2]. Разработчику ФКЗИ также известны остаточное сопротивление ключа в открытом положении $R_{к\lambda}$ и диапазон допустимых значений параметров элементов $\bar{X}_{\min} \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{\max}$, где \bar{X} – набор значений номиналов элементов R и C (отметим, что типичными размерностями номиналов элементов в схемах ФКЗ являются кОм, мкФ).

Методику синтеза ФКЗИ представим в виде следующего алгоритма.

1. Выбор по виду заданной передаточной функции принципиальной схемы в форме каскадного соединения необходимого числа интегрирующих и пропорционально-интегрирующих звеньев.

2. Расчет в символьном виде коэффициентов передаточной функции при открытом положении ключа a_{oi}, b_{oi} .

3. Выбор места включения ключа.

4. Генерация в пространстве номиналов элементов, ограниченном снизу и сверху значениями $X_{\min l}, X_{\max l}, l = \overline{1, N_{эл}}$ точек X_l^k , по формуле

$$X_l^k = \begin{cases} \exp(\ln X_{\min l} + \alpha_l^k (\ln X_{\max l} - \ln X_{\min l})), & \frac{X_{\max l}}{X_{\min l}} > 100, \\ X_{\min l} + \alpha_l^k (X_{\max l} - X_{\min l}), & \frac{X_{\max l}}{X_{\min l}} \leq 100, \end{cases} \quad k = \overline{1, N_{np}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{пр}}$ – выбранное число точек просчета; α_i^k – точки ЛПТ-последовательности [3, 4].

5. Расчет целевой функции f^k по формуле

$$f^k = 100 \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{b_{oi}^k}{b_{oi}} - 1 \right| + \sum_{j=1}^m \left| \frac{a_{oj}^k}{a_{oj}} - 1 \right| + \sum_{i=1}^n \left| \frac{b_{zi}^k}{b_{zi}} - 1 \right| + \sum_{j=1}^m \left| \frac{a_{zj}^k}{a_{zj}} - 1 \right| \right), \quad (4)$$

где $a_{oj}, b_{oi}, a_{zj}, b_{zi}$ – заданные коэффициенты передаточной функции при открытом и закрытом положениях ключа; a_{oj}^k, b_{oi}^k – фактические значения коэффициентов передаточной функции при открытом положении ключа при наборе номиналов элементов $\overrightarrow{X^k} = \{X_1^k, X_2^k \dots X_{N_{\text{эл}}}^k\}$, рассчитанные по формулам п. 2; a_{zj}^k, b_{zi}^k – фактические значения коэффициентов передаточной функции при закрытом положении ключа и наборе номиналов элементов $\overrightarrow{X^k}$, рассчитанные по формулам п. 2; при этом номинал коммутируемого резистора $X_{\text{ком}}^k$ заменяется значением сопротивления параллельного соединения сопротивления ключа и данного резистора.

Отметим, что при таком выборе целевой функции исключается влияние абсолютных значений коэффициентов передаточной функции, а оценивается только их процентное отклонение от желаемых значений.

6. Выбор набора параметров X_i^* , обеспечивающих минимальное значение целевой функции (4).

7. Переход к п. 4, если минимальное значение целевой функции $f_{\text{min}} \leq 50$.

8. Сокращение границ пространства номиналов элементов по формулам:

$$X_{\text{min сокр}_i} = \begin{cases} \frac{X_i^*}{K_{\text{сокр}}}, & X_{\text{min}_i} < \frac{X_i^*}{K_{\text{сокр}}}; \\ X_{\text{min}_i}, & X_{\text{min}_i} \geq \frac{X_i^*}{K_{\text{сокр}}} \end{cases}; \quad (5.1)$$

$$X_{\text{max сокр}_i} = \begin{cases} X_i^* K_{\text{сокр}}, & X_i^* < \frac{X_{\text{max}_i}}{K_{\text{сокр}}}; \\ X_{\text{max}_i}, & X_i^* \geq \frac{X_{\text{max}_i}}{K_{\text{сокр}}} \end{cases}, \quad (5.2)$$

где $K_{\text{сокр}} = 3$ – коэффициент сокращения границ пространства номиналов элементов.

9. Расчет по п. 4–7 при новых границах пространства номиналов элементов.

10. Сокращение границ по формулам (5.1), (5.2) при $K_{\text{сокр}} = 3$.

11. Расчет по п. 9.

12. Расчет по п. 10 при $K_{\text{сокр}} = 2$.

13. Расчет по п. 9.

14. Минимизация целевой функции методом Хука-Дживса.

15. Конец.

Для реализации пунктов 2 и 4–15 на языке Pascal были написаны программы SymKo и Syn.

Рассмотрим практическое применение описанной методики.

Дано:

$$W_o(p) = \frac{1 + 2 \cdot 10^{-3} p}{(1 + 5 \cdot 10^{-2} p)(1 + 3 \cdot 10^{-4} p)} = \frac{2 \cdot 10^{-3} p + 1}{1,5 \cdot 10^{-5} p^2 + 5,03 \cdot 10^{-2} p + 1};$$

$$W_s(p) = \frac{1 + 2 \cdot 10^{-3} p}{(1 + 3 \cdot 10^{-3} p)(1 + 2 \cdot 10^{-4} p)} = \frac{2 \cdot 10^{-3} p + 1}{6 \cdot 10^{-7} p^2 + 3,2 \cdot 10^{-3} p + 1},$$

ключевой элемент – K168КТ2А ($R_{\text{кл}} = 100 \text{ Ом}$ [5]);

диапазоны допустимых значений номиналов элементов:

резисторов – от 0,01 до 100 кОм,

конденсаторов – от 0,01 до 100 мкФ.

Выбираем принципиальную схему в виде каскадного соединения пропорционально-интегрирующего и интегрирующего звеньев (рис. 3а). Рассчитанные коэффициенты передаточной функции при открытом положении ключа равны:

$$a_{01} = R_2 C_1;$$

$$b_{01} = C_1(R_1 + R_2) + C_2(R_1 + R_3);$$

$$b_{02} = C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3).$$

Так как коэффициент передаточной функции a_1 не меняется, выбираем в качестве коммутируемого резистора R_1 (рис. 3б).

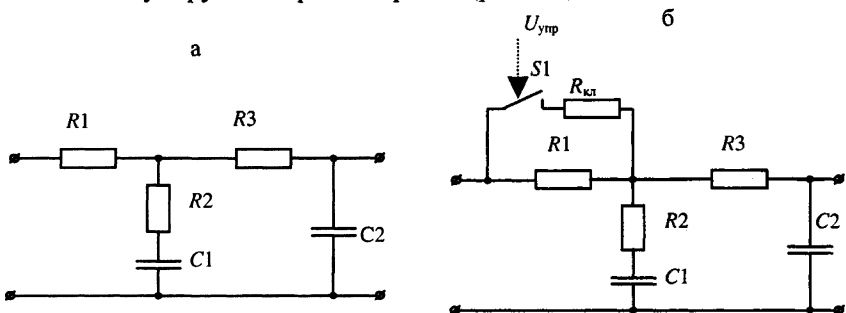


Рис. 3

При числе точек просчета $N_{\text{пр}} = 250$ вычисления по пунктам 4–6 алгоритма дали минимальное значение целевой функции $f_{\text{min}} = 1,28840 \cdot 10^4 \%$. После расчета по пунктам 8, 9 получено значение $f_{\text{min}} = 1,84194 \cdot 10^3 \%$, в результате выполнения пунктов 10, 11 – $f_{\text{min}} = 7,39521 \cdot 10^2 \%$, после расчета по пунктам 12, 13 минимальное значение целевой функции и номиналы элементов соответственно равны: $f_{\text{min}} = 1,48619 \cdot 10^2 \%$; $R1^* = 4,74187$ кОм; $R2^* = 2,02086 \cdot 10^{-1}$ кОм; $R3^* = 2,77450 \cdot 10^{-1}$ кОм; $C1^* = 9,59782$ мкФ; $C2^* = 6,04568 \cdot 10^{-1}$ мкФ.

После минимизации целевой функции (4) методом Хука-Дживса имеем: $f_{\text{min}} = 3,46928 \cdot 10^{-6} \%$; $R1^* = 4,43367$ кОм; $R2^* = 2,02383 \cdot 10^{-1}$ кОм; $R3^* = 1,40326 \cdot 10^{-1}$ кОм; $C1^* = 9,88231$ мкФ; $C2^* = 9,80620 \cdot 10^{-1}$ мкФ. При этом коэффициенты передаточной функции в открытом и закрытом положениях ключа соответственно равны:

$$a_{01} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad a_{31} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$b_{01} = 5,03003 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad b_{31} = 3,19995 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$b_{02} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2; \quad b_{32} = 6,00001 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2.$$

Мы видим, что предложенная методика позволяет синтезировать схему с приемлемой в инженерной практике точностью.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика синтеза ФКЗИ, позволяющая учитывать остаточное сопротивление ключа в открытом положении, а также ограничения на допустимый диапазон номиналов элементов.
2. Разработан пакет программ для автоматизации синтеза ФКЗИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В. А., Малиновский В. Н., Романов С. К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь, 1989. – 232 с.
2. Кузнецов А. П., Батура М. П., Шилин Л. Ю. Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. – Мн.: Наука і тэхніка, 1993. – 224 с.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
4. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 110 с.
5. Булычев А. Л., Галкин В. И., Прохоренко В. А. Аналоговые интегральные схемы: Справ. – Мн.: Беларусь, 1985. – 223 с.

Представлена кафедрой
теоретических основ
электротехники

Поступила 26.12.2001