

## Принципы выполнения и исследование характеристик адаптивных формирователей ортогональных составляющих микропроцессорных защит электроустановок

Рождественский А.В.

Белорусский национальный технический университет

Входные сигналы микропроцессорных защит электроустановок могут быть представлены параметрами векторов, такими как амплитуды и фазы, а также эквивалентными им ортогональными составляющими (ОС). Адаптивные формирователи ОС входных сигналов содержат необходимую последовательность операций с отсчетами их мгновенных значений, которые выполняются с помощью микропроцессорных средств. Предварительно сигналы подвергаются цифровой фильтрации с целью выделения основных гармоник.

Поступающий на вход микропроцессорной защиты сигнал обрабатывается аналоговым фильтром нижних частот (ФНЧ). Можно считать, что ФНЧ полностью пропускает апериодическую составляющую и задерживает высшие гармоники с порядком  $m > N$ . В этом случае сигнал на выходе ФНЧ будет.

$$u(t) = U_a e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{m=1}^N U_m \sin \psi_m, \quad (1)$$

где  $\psi_m = m\omega_0 t + \varphi_m$  текущая фаза  $m$ -й гармоники

Непосредственное использование (1) в качестве модели входного сигнала затрудняет решение задачи синтеза ЦФ. Поэтому примем во внимание факт конечного времени наблюдения защитой за сигналами, которое находится на уровне периода промышленной частоты. Это дает возможность аппроксимировать апериодическую составляющую на интервале наблюдения отрезком прямой. При таком подходе модуль разности смежных дискретных значений периодической составляющей, зафиксированной на интервале  $\Delta t$ , является величиной постоянной.

Пусть на интервале наблюдения зафиксированы  $n$  значений сигнала, тогда с учетом вышесказанного можно составить систему уравнений, решение которой может быть представлено в виде

$$u_n = \sum_{i=1}^n (a_i \cup b_i) u_i \quad (2)$$

где  $a_i, b_i$  — постоянные коэффициенты;  $u_n$  — отсчет основной гармоники сигнала, относящийся к концу интервала наблюдения  $t_n$ .

Выражение (2) представляет собой ЦФ, выделяющий основную гармонику из сигнала  $u(t)$  с граничной частотой спектра  $f_{cp}$ .

Отсчеты мгновенных значений выходного сигнала ЦФ (2) являются отсчетами синусной ОС  $u_{s(n)} = u_n$ . С помощью (9) достаточно сформировать только отсчеты мгновенных значений косинусной ОС  $u_{c(n)}$ .

Цифровой отсчет вспомогательного сигнала, сдвинутого в сторону отставания на угол  $\alpha$  без изменения амплитуды, может быть получен как

$$u_{v(n)} = u_{vx(n-i)}, \quad (5)$$

где  $i=1v2v\dots v(n-1)$ .

Отсчеты первого и второго дополнительных сигналов формируются следующим образом:

$$u_{1(n)} = 0,5(u_{ax(n)} + u_{ax(n-i)}) \quad (6)$$

$$u_{2(n)} = 0,5(u_{ax(n)} - u_{ax(n-i)}) \quad (7)$$

где  $i=1v2v\dots v(n-1)$ .

Адаптивный принцип формирования ОС заключается в получении цифрового отсчета вспомогательного сигнала в соответствии с (8), формировании цифровых отсчетов двух дополнительных сигналов по (6) и (7), с последующим определением отсчета косинусной ОС по выражению (9).

$$u_{s(n)} = u_{1(n)} + u_{2(n)}; \quad (8)$$

$$u_{c(n)} = \frac{u_{2(n)} (u_{1(n-1)}^2 - u_{1(n)}^2) - u_{1(n)} (u_{2(n)}^2 - u_{2(n-1)}^2)}{[(u_{2(n)}^2 - u_{2(n-1)}^2)(u_{1(n-1)}^2 - u_{1(n)}^2)]^{1/2}} \quad (9)$$

В основе реализации адаптивных формирователей ОС рассмотренного принципа исполнения лежит последовательное выполнение следующих операций:

- преобразование входного сигнала тока или напряжения в пропорциональный сигнал напряжения;
- предварительная аналоговая фильтрация полученного сигнала напряжения активным фильтром нижних частот;
- аналого-цифровое преобразование и фиксация последовательных отсчетов мгновенных значений выходного сигнала активного фильтра;
- цифровая фильтрация полученных отсчетов и определение отсчета мгновенного значения синусной ОС основной частоты, относящегося к концу интервала наблюдения;
- фиксация двух последовательных значений синусной ОС, разделенных шагом  $\Delta t$ , и определение по ним отсчета косинусной ОС.

Для преобразования входного сигнала тока или напряжения в пропорциональный сигнал напряжения наиболее эффективно использование промежуточных трансформаторов с теми же техническими решениями, которые широко применяются в защитах микроэлектронного исполнения.

Адаптивные формирователи ортогональных составляющих (ФОС) должны обеспечивать независимость амплитуд сигналов и углов сдвига фаз между ними от изменений промышленной частоты. При этом они должны обладать соответствующими частотными и динамическими свойствами, обеспечивая четкое выделение сигнала основной частоты и высокое быстродействие. Указанные свойства могут быть оценены на основе анализа амплитудно-частотных (АЧХ) и переходных характеристик ФОС, которые полностью отражают их уровень технического совершенства.

Характеристики ФОС определяются как их отклики на некоторые сигналы специальной формы. Для получения характеристик ФОС методом вычислительного эксперимента используются их математические модели.

Для нахождения точек АЧХ, соответствующих заданному значению частоты  $f$ , необходимо знать при этом значение амплитуды входного и выходного синусоидальных сигналов. Для этого производится расчет ФОС с использованием уравнений его модели на временном интервале, обеспечивающем наступление установившегося режима. По отсчетам мгновенных значений сигналов определяются их амплитуды и соответствующие

щие точки АЧХ. Для построения АЧХ вычисления повторяются для заданных точек всей шкалы частот.

В рамках настоящей работы были получены адаптивные ФОС, использующие 14, 16, 18 отсчетов мгновенного сигнала. Затем методом вычислительного эксперимента определялись характеристики указанных ФОС.

Следует отметить, что ФОС, при использовании для выделения составляющей основной частоты цифровых фильтров с коэффициентами  $b_i$  имеют несколько худшую избирательность, чем при использовании ЦФ с коэффициентами  $a_i$ . Амплитудно-частотные характеристики ФОС полностью определяются частотными свойствами ЦФ и совпадают для синусной и косинусной ОС.

Анализ полученных АЧХ показывает, что с увеличением  $n$  избирательность ФОС повышается, причем АЧХ сохраняют нули в гармониках, кратных основной. Наилучшую форму АЧХ имеет ФОС при 18 отсчетах мгновенного сигнала. Такой формирователь хорошо подавляет низкочастотные составляющие и лучше других высшие гармоники.

В результате выполненных расчетов также установлено, что все реализации ФОС имеют линейные фазочастотные характеристики в диапазоне частот 45-55 Гц. При этом угол сдвига фаз

между ОС не зависит от частоты и равен  $\frac{\pi}{2}$ .

Переходный процесс в ФОС включает две стадии. На первой стадии устанавливаются процессы в ФНЧ. Её продолжительность зависит от частоты среза фильтра. Известно, что с уменьшением указанной частоты инерционность ФНЧ возрастает. На второй стадии устанавливаются процессы в ЦФ. Очевидно, что с увеличением числа  $n$  продолжительность данной стадии увеличивается. В целом с увеличением  $n$  быстродействие ФОС растет за счет увеличения требуемой частоты среза ФНЧ. Следует отметить, что наиболее приемлемый характер переходного процесса в ФОС обеспечивается в том случае, когда все коэффициенты ЦФ  $a_i$  и  $b_i$  по модулю меньше единицы.

Предложенные адаптивные ФОС входных сигналов для микропроцессорных защит отличаются более высокими показателями технического совершенства, чем ранее рассматривавшиеся аналогичного исполнения.