

УДК 621.316.925.1

## ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВЕЛИЧИН В МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТЕ ПОНИЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А., инж. ЛОМАН М. С.

*Белорусский национальный технический университет*

Микропроцессорная защита понижающего трансформатора производит контроль токов сторон и напряжений трансформатора. На основании измеренных токов, параметров силового трансформатора и параметров трансформаторов тока (ТТ) микропроцессорной защитой рассчитываются мгновенные значения дифференциального и тормозного токов. Для работы дифференциальной ступени необходимо контролировать 1-, 2- и 5-ю гармоники дифференциального тока. Для расчета условий срабатывания ступени с учетом тормозной характеристики используется 1-я гармоника. Содержание 2-й гармоники в дифференциальном токе является критерием обнаружения броска тока намагничивания, а содержание 5-й гармоники – критерием обнаружения режима перевозбуждения сердечника трансформатора [1]. Таким образом, для дифференциальной защиты контролируемыми величинами являются 1-, 2- и 5-я гармоники тока.

Важная задача при разработке микропроцессорной защиты понижающего трансформатора – реализация цифровых фильтров ортогональных составляющих (ОС) для 1-, 2- и 5-й гармоник [2].

В микропроцессорных защитах для формирования ОС наиболее часто применяется алгоритм Фурье. Алгоритм Гёрцеля (англ. Goertzel algorithm) – специальная реализация дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в форме рекурсивного фильтра. Данный алгоритм был предложен Джеральдом Гёрцелем в 1958 г. [3]. Алгоритм Гёрцеля позволяет вычислить значение одного частотного компонента. По сравнению с быстрым преобразованием Фурье преимуществом алгоритма Гёрцеля является большая вычислительная эффективность, позволяющая находить все частотные компоненты ДПФ.

Частота фильтрации определяется по формуле

$$f(k) = \frac{k}{N} f_s, \quad (1)$$

где  $f_s$  – частота дискретизации;  $N$  – число выборок;  $k$  – номер гармоники.

Формула алгоритма Гёрцеля расчета ОС  $k$ -й гармоники имеет вид

$$X(k) = \left( \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{N-1} - v_{N-2} \right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{N-1}. \quad (2)$$

Коэффициенты  $v_{N-1}$ ,  $v_{N-2}$  рассчитываются по выражению

$$v_i = x_i + 2 \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{i-1} - v_{i-2}, \quad (3)$$

где  $0 \leq i \leq (N-1)$ ,  $v_{-2} = v_{-1} = 0$ .

Для реализации формулы (2) необходимо знать только  $v_{N-1}$  и  $v_{N-2}$ , поэтому при вычислении  $v_i$  по формуле (3) нет необходимости запоминать все полученные значения, а достаточно помнить только последние два результата.

Для обеспечения необходимой точности расчета выбрана частота дискретизации 1 кГц с использованием 20 выборок.

Ниже представлены амплитудно-частотные (АЧХ) и переходные характеристики формирователей ОС, полученные методом вычислительного эксперимента. В основу реализации этого метода положены математические модели формирователей, включающие модели входных преобразователей тока, аналоговых фильтров 2-го порядка с частотой среза 1 кГц и цифровых фильтров 1-, 2- и 5-й гармоник по алгоритму Гёрцеля.

На рис. 1 приведены АЧХ для синусной  $I_s$ , косинусной  $I_c$  и действующих  $I$  значений фильтра 1-й гармоники.

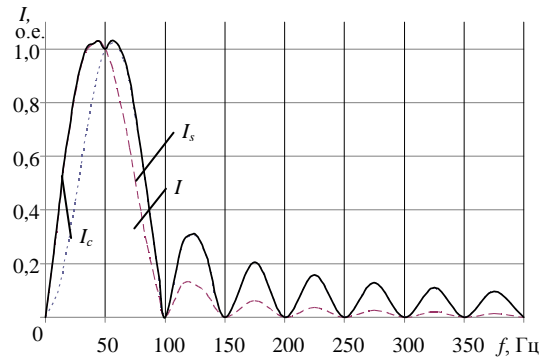


Рис. 1. АЧХ фильтра 1-й гармоники

Как видно из рис. 1, фильтр 1-й гармоники надежно подавляет все гармоники, кроме первой. Сигнал частотой 50 Гц появляется на выходе без ослабления и усиления. В диапазоне частот 45–52 Гц (различных режимов работы энергосистемы) фильтр имеет погрешность до 3 %. Для обеспечения достаточной точности при изменении частоты в указанном диапазоне целесообразно использовать одно из следующих решений:

- изменять число выборок с постоянной частотой дискретизации;
- осуществлять подстройку частоты дискретизации при частотах, отличающихся от 50 Гц.

Алгоритм с изменением числа выборок представляется предпочтительным, так как реализуется в программе с постоянной длительностью цикла расчета, что обеспечивает стабильность и высокую надежность вычислений. В табл. 1 представлены частоты настройки фильтров с различным числом выборок (при частоте дискретизации 1 кГц), а также частоты перехода с одного числа выборок на другое.

Таблица 1

Настройка числа выборок фильтра 1-й гармоники

Число выборок	19	20	21	22	23
Частота настройки, Гц	52,63	50,00	47,62	45,45	43,48
Частота перехода, Гц	51,32	48,81	46,54	44,47	–

На рис. 2 приведены АЧХ синусной  $I_s$ , косинусной  $I_c$  и действующих  $I$  значений фильтра 2-й гармоники. Фильтр 2-й гармоники полностью подавляет все гармоники, кроме второй. Сигнал частотой 100 Гц появляется на выходе без ослабления и усиления.

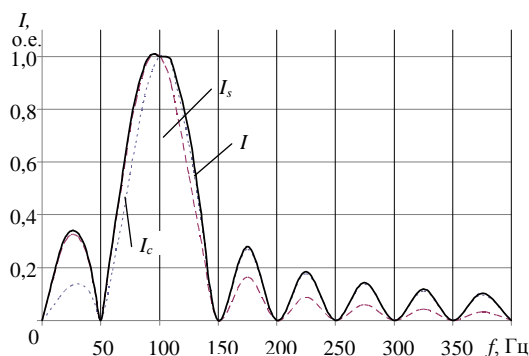


Рис. 2. АЧХ фильтра 2-й гармоники

На рис. 3 приведены АЧХ синусной  $I_s$ , косинусной  $I_c$  и действующих  $I$  значений фильтра 5-й гармоники. АЧХ синусной  $I_s$  и косинусной  $I_c$  составляющих совпадают.

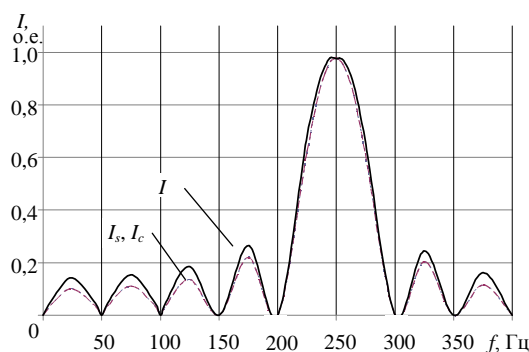


Рис. 3. АЧХ фильтра 5-й гармоники

Фильтр 5-й гармоники полностью подавляет все гармоники, кроме пятой (рис. 3). Сигнал частотой 250 Гц появляется на выходе с ослаблением на 3 %, что связано с действием аналогового фильтра. При реализации измерения 5-й

гармоники необходимо учитывать ослабление сигнала аналоговым фильтром с помощью поправочного коэффициента.

На рис. 4 представлена динамическая характеристика фильтра 1-й гармоники при подаче на вход фильтра синусоидального сигнала 50 Гц. Установившееся значение достигается за период промышленной частоты 20 мс.

На рис. 5 представлена динамическая характеристика фильтра 2-й гармоники при подаче на вход фильтра синусоидального сигнала 100 Гц. Установившееся значение достигается за период промышленной частоты 20 мс.

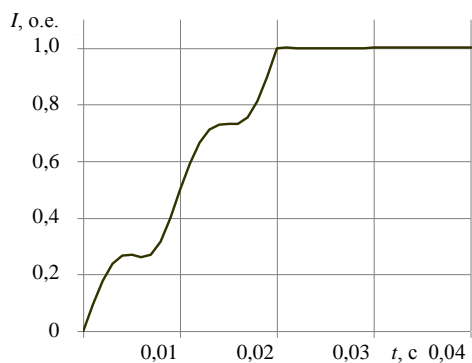


Рис. 4. Переходная характеристика фильтра 1-й гармоники

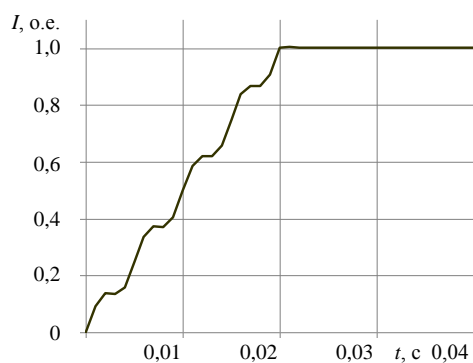


Рис. 5. Переходная характеристика фильтра 2-й гармоники

На рис. 6 представлена динамическая характеристика фильтра 5-й гармоники при подаче на вход фильтра синусоидального сигнала 250 Гц. Установившееся значение достигается за период промышленной частоты 20 мс.

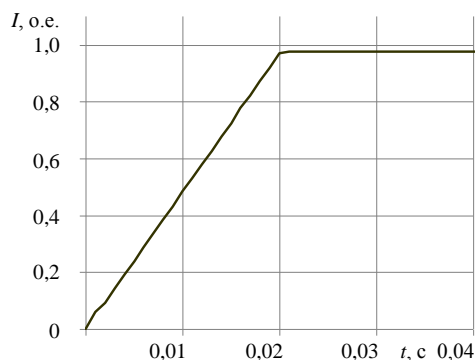


Рис. 6. Переходная характеристика фильтра 5-й гармоники

Следует отметить, что быстродействие фильтров 1-, 2- и 5-й гармоник вполне приемлемо для реализации на их основе дифференциальной защиты трансформатора.

## ВЫВОДЫ

Алгоритм Гёрцеля для формирования ортогональных составляющих позволяет осуществлять фильтрацию 1-, 2- и 5-й гармоник в течение одного периода промышленной частоты, что достаточно для реализации измерительных органов дифференциальной защиты трансформатора. Фильтр

1-й гармоники точно настроен на частоту 50 Гц, однако в диапазоне рабочих частот (47–52 Гц) имеет погрешность до 3 %. Для обеспечения достаточной точности фильтрации целесообразно менять число выборок на период при изменении частоты сети.

Фильтр 2-й гармоники полностью подавляет все гармоники, кроме второй, выходной сигнал частотой 100 Гц появляется на выходе без ослабления и усиления.

При фильтрации 5-й гармоники сигнал ослабляется до величины 97 %, что обусловлено действием аналогового фильтра. При реализации дифференциальной защиты трансформатора ослабление 5-й гармоники должно быть учтено с помощью поправочного коэффициента.

Формула Гёрцеля для формирования ортогональных составляющих 1-, 2- и 5-й гармоник может быть применена при реализации цифровой дифференциальной защиты трансформатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ц и г л е р, Г. Цифровая дифференциальная защита: принципы и область применения: пер. с англ. / Г. Циглер; под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Знак, 2008. – 216 с.
2. Р о м а н ю к, Ф. А. Микропроцессорная защита силовых понижающих трансформаторов / Ф. А. Романюк, С. П. Королев, М. С. Ломан // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 5. – С. 5–10.
3. А й ф и ч е р, Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 10.05.2012