

## Алгоритм цифровой обработки сигналов для контроля критических параметров сети электроснабжения

*А.Е. Епишкин, В.В. Резниченко*

*Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет*

**Аннотация:** В статье представлен алгоритм цифровой обработки для контроля токов короткого замыкания сети электроснабжения. Предлагается осуществление контроля с помощью вычисления скорости изменения тока. Разработан алгоритм на основе цифрового дифференцирующего фильтра с подавлением высокочастотных составляющих. На основе рядов Фурье сформирован нерекурсивный фильтр, характеристики которого улучшаются с помощью метода сглаживания Ланцоша. Предложено для сохранения обработки использовать рекурсивный фильтр, преобразованный из нерекурсивного, используя алгоритм Б.Л. Хо. Алгоритм легко реализуется в виде программ для микропроцессорных систем. Представлен фильтр на основе аналогового прототипа. Проведено моделирование процесса короткого замыкания.

**Ключевые слова:** электроснабжение, ток короткого замыкания, алгоритм обработки данных, контроль системы энергообеспечения, цифровой дифференцирующий фильтр.

### Введение

Решение задач диагностики короткого замыкания (КЗ) в сети энергоснабжения с минимальным временем является очень важной, так как предотвращает негативные последствия в сети. Обычно КЗ приводят к скачкообразным изменениям тока. Фиксация этого скачка аппаратами защиты осуществляется путем контроля амплитуды тока. Это приводит к ограничению времени диагностики в  $\frac{1}{2}$  периода для переменного тока, что составляет 0,01 с.

В статье предлагается осуществить контроль этого скачка по скорости нарастания тока, так как для этого требуется значительно меньше времени. Как правило, в ряде сетей переходные процессы быстротечны, как как не содержать инерционных элементов. Кроме того, информация о скорости нарастания тока важна для защиты преобразователей, как как многие электронные компоненты критичны к этому параметру. По схожим темам опубликован ряд статей [1, 2, 3].

Проблема контроля тока потребления является актуальной несмотря на множество трудов специалистов по релейной защите, силовой электронике [4-6]. С момента применения для этой цели микропроцессорных систем качество защиты существенно изменилось: сократилось на порядок время реагирования системы. Для того, чтобы эффективно решать эту задачу, необходимо определять скорость изменения тока. Этот параметр является важным еще и потому, что многие электронные устройства чувствительны к этой величине.

Определение изменения тока - это задача дифференцирования. В микропроцессорных системах она решается с помощью применения дифференцирующего фильтра с подавлением высокочастотных составляющих, что позволяет контролировать изменения переменного тока систем электроснабжения. Формирование критерия отключения сетей является особой задачей. Но даже в простейшем случае, когда в качестве этого критерия применить ограничение скорости тока, система контроля может существенно повысить быстродействие.

Сформулируем необходимые условия для цифрового дифференцирующего фильтра с подавлением высокочастотных составляющих для переменного тока с частотой. Необходимым требованиям отвечает передаточная функция [7]:

$$H(\omega) = \begin{cases} \omega, & \text{при } -\omega_{\text{ГР}} \leq \omega \leq \omega_{\text{ГР}} \\ 0, & \text{при } |\omega| \geq \omega_{\text{ГР}} \end{cases}, \quad (1)$$

изображённая на рис. 1.

Выбор частоты дискретизации должен отвечать условиям

$$\omega_{\text{д}} \gg 2\omega_{\text{ГР}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{ГР}}$  - граничная частота, например  $\omega_{\text{д}} = 4\omega_{\text{ГР}}$ , что при промышленной частоте 50 Гц, будет соответствовать частоте дискретизации  $f = 200$  Гц,

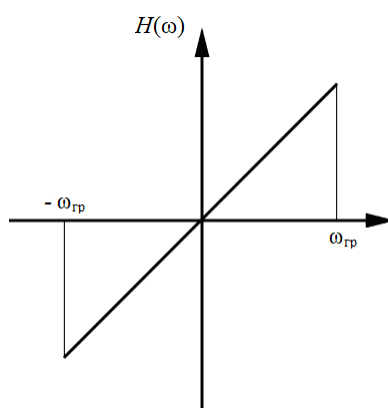


Рис. 1. - Передаточная функция фильтра.

Методы построения нерекурсивных цифровых фильтров изложены [7-9]. Воспользуемся методом разложения в ряд Фурье передаточных функций [7]. Вследствие нечетности функции  $H(\omega)$ , представленной на рис. 1 получаем разложение по синусам:

$$b_k = \frac{\omega_d \sin \frac{\pi}{2} k}{k^2 \pi^2} - \frac{\omega_d}{2\pi k} \cos \frac{\pi}{4} k. \quad (3)$$

Уравнение (3) формируем коэффициентом нерекурсивного фильтра. При этом это бесконечный и убывающий ряд. Ограничение на количество членов разложения приводит к явлению Гиббса. Это значительно искажает результаты обработки при решении задачи контроля скорости изменения тока. Решение этой проблемы в рамках классической теории предлагается с помощью весовых функций. Одним из методов, показавшим хороший результат, является сглаживание Ланцоша с применением сигма-множителей. Коэффициенты цифрового нерекурсивного фильтра будут иметь вид:

$$c_0 = 0, \quad c_k = \frac{1}{2} b_k \sigma(N, k) \text{ при } k > 0 \text{ и } c_k = c_{-k} \text{ при } k < 0. \quad (4)$$

где  $b_k$  получаем из (3),

$$\sigma(N, k) = \frac{\sin\left(\frac{\pi k}{N}\right)}{\frac{\pi k}{N}}, \quad (5)$$

где  $N$  - количество членов разложения в ряд Фурье.

Итоговый нерекурсивный фильтр существенно повышает точность обработки.

Можно записать передаточную функцию нерекурсивного дифференциального цифрового фильтра порядка  $2N+1$ :

$$H(z) = c_{-N} + c_{-N+1}z^{-1} + \dots c_{-1}z^{-N} + 0 + c_1z^{-N+1} \dots c_Nz^{-2N}. \quad (6)$$

Это ряд с убывающими коэффициентами. При выборе частоты дискретизации  $\omega_d = 4\omega_{гр}$ , каждый четный коэффициент будет равен нулю.

Сформировав матрицу Ганкеля, согласно алгоритму Б. Л. Хо [10]:

$$H = \begin{bmatrix} c_{-N+2} & c_{-N+4} & \dots & \dots \\ c_{-N+4} & c_{-N+6} & \cdot & \cdot \\ \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \dots & \cdot & \cdot & c_N \end{bmatrix}, \quad (7)$$

можно найти матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  соответствующие системе уравнений в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} D &= C_{-N} \\ z^2x &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (8)$$

где  $u$ ,  $y$  - изображения входной и выходной переменной соответственно.

Передаточная функция  $H(z)$ , соответствующая данной системе, будет рациональной функцией, аппроксимирующей ряд (4).

Синтезируем цифровой фильтр (ЦФ) по аналоговому прототипу. Ищется передаточная функция (ПФ), которая должна выполнять роль дифференциатора. Но так как подобное звено значительно усиливает помехи

и кратные гармонические составляющие, оно физически не реализуемо. Используем комбинированное звено дифференциации с фильтром низких частот (НЧ). Из соображений простоты выбираем фильтр Баттерворта 2-го порядка, имеющий гладкую характеристику в полосе пропускания и плавный переход от полосы пропускания к полосе задерживания. В случае необходимости можно увеличивать порядок фильтра. Получаем ПФ аналогового прототипа:

$$H(s) = \frac{s}{(16 \cdot 10^{-4})^2 s^2 + 1,4 \cdot 16 \cdot 10^{-4} s + 1}. \quad (9)$$

Переход к ЦФ осуществляем путем преобразования:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_d}, \text{ где } z^{-1} = e^{-sT_d}. \quad (10)$$

Это первое простейшее приближение. Задача синтеза сводится к нахождению простейшей структуры с минимальным количеством элементов задерживания, так как для задачи диагностики время критично. Исходя из вышеизложенного, для переменного сигнала с частотой 50 Гц ( $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ ) получаем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), представленную на рис. 2.

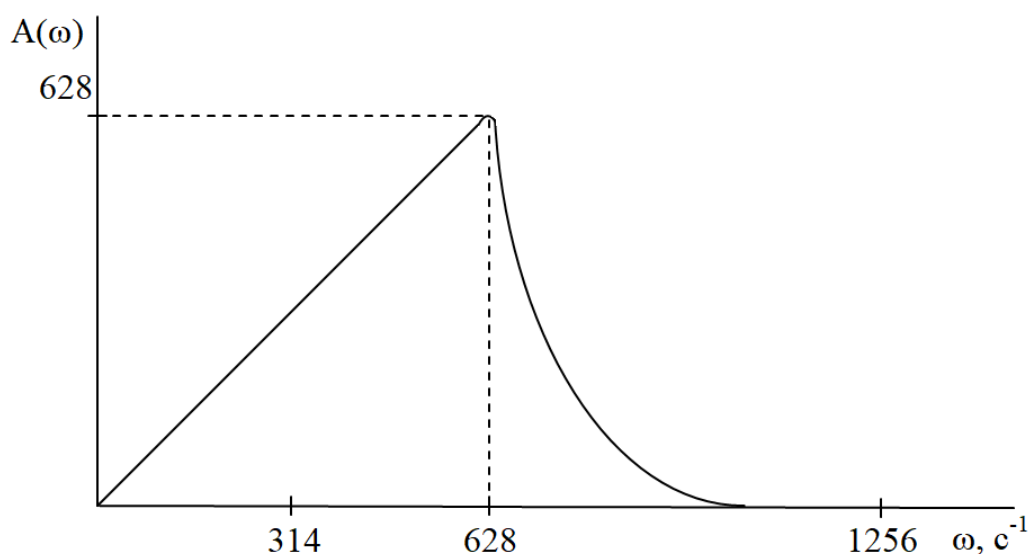


Рис. 2. АЧХ цифрового дифференцирующего фильтра

Приближенное соотношение частот  $\omega=1/T$  и постоянных времени, для рис. 2, составляют: частота дискретизации  $\omega_d=628 \text{ с}^{-1}$  ( $T_d=8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  - период дискретизации) и граничная частота  $\omega_{гр}=628 \text{ с}^{-1}$  ( $T_{гр}=16 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  - постоянная времени соответствующая граничной частоте).

Получим ПФ цифрового фильтра:

$$H(s) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{1250(1 - z^{-1})}{4 - 8z^{-1} + 4z^{-2} + 2,8 - 2,87z^{-1} + 1}, \quad (10)$$

что соответствует разностному уравнению:

$$y_k = 160,26x_k + 160,26x_{k-1} + 1,38y_{k-1} - 0,5128y_{k-1}, \quad (11)$$

являющемуся основой для составления структурной схемы ЦФ (рис. 3).

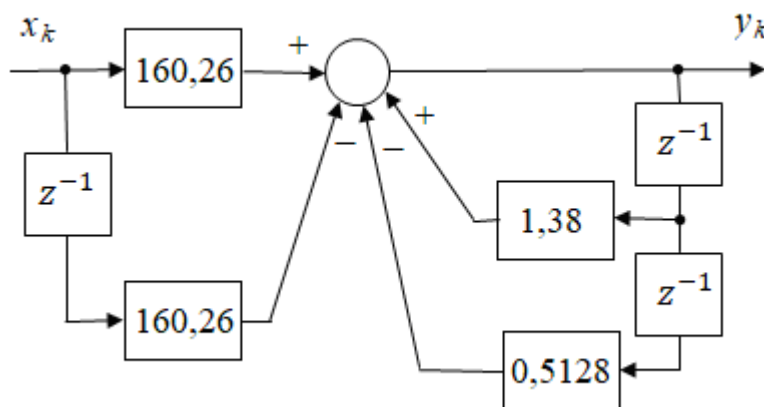


Рис. 3. Структурная схема ЦФ

Результаты цифрового моделирования позволяют получить следующий график процесса КЗ в момент времени  $t = 1 \text{ с}$  (рис. 4).

При десятикратном увеличении тока в момент КЗ, двукратное изменение скорости нарастания тока КЗ можно зафиксировать через 0,002 с.

Критерий отключения системы или диагностическим признаком КЗ будем считать двукратное превышение максимального значения скорости нарастания тока. Возможны другие критерии контроля, но они остались за рамками этой статьи.

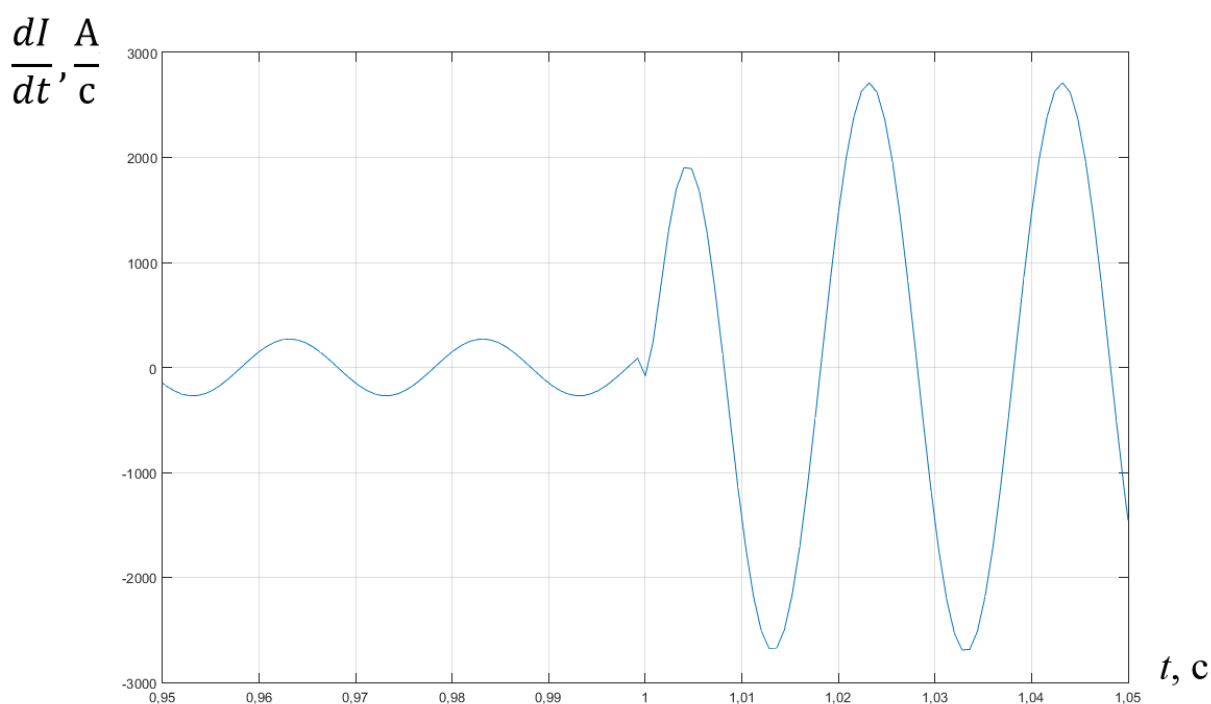


Рис. 4. Моделирование работы ЦФ

При десятикратном увеличении тока в момент КЗ, двукратное изменение скорости нарастания тока КЗ можно зафиксировать через 0,002 с.

Критерий отключения системы или диагностическим признаком КЗ будем считать двукратное превышение максимального значения скорости нарастания тока. Возможны другие критерии контроля, но они остались за рамками этой статьи.

В работе рассмотрен разработанный алгоритм для контроллеров сетей электроснабжения, позволяющий с минимальным временем осциллировать диагностику КЗ. Решение предложено на базе дифференцирующего цифрового фильтра.

Сформированный алгоритм позволяет создать программу для микропроцессорной системы контроля тока путем вычисления скорости изменения тока. В основе алгоритма положен цифровой дифференцирующий рекурсивный фильтр. Путем подбора частоты порядок этого фильтра можно

изменить в два раза. Переход к рекурсивному цифровому фильтру сокращает порядок фильтра еще в два раза. Таким образом, существенно уменьшается загрузка вычислительных систем, сокращается время реагирования системы на аварийное изменение тока. Контроль токов короткого замыкания предлагается вести по ограничению скорости изменения тока. Вопрос выработки более сложного критерия остается за рамками этой статьи.

### Литература

1. Овчаренко Н.И. Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. – М.: НТФ «Энергопрогресс». 2006. 120 с.
2. Линович А.Ю. Методы многоскоростной обработки сигналов в сетях распределенных датчиков сбора информации // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2370](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2370) (дата обращения: 30.11.2025).
3. Гаглюева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842) (дата обращения: 30.11.2025).
4. Шмурьев В.Я. Цифровые реле защиты. - М.: НТФ «Энергопрогресс». 1999. 56 с.
5. Лямец Ю.Я. Метод производящих уравнений в цифровой обработке напряжения и тока электрической сети. // Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф. «Современная релейная защита электроэнергетических объектов». Чебоксары. 1991. С. 38-41.
6. Лямец Ю.Я., Шевцов. В.М. К синтезу фильтров симметричных составляющих // Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем: Тр. ВНИИР. Чебоксары. 1985. С. 31-40.

7. Hamming R.W. Digital filters, Second Edition. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 07632, 1983. 224 с.
8. Smith Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, San Diego, California. 1999. 664 с.
9. Rabiner L.R., B. Gold B., Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1975. 762 с.
10. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A., Topic in mathematical system theory. McGraw-Hill Inc. 1969. 359 p.

### References

1. Ovcharenko N.I. Tsifrovyye apparatnyye i programmnyye elementy mikroprotsessornoy releynoy zashchity i avtomatiki energosistem [Digital hardware and software elements of microprocessor relay protection and automation of power systems]. M.: NTF «Energoprogress». 2006. 120 p.
2. Linovich A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №5 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2370 (accessed: 30.11.2025).
3. Gagloyeva I.E., Dobayev A.Z., Dedegkayeva A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842 (accessed: 04.11.2025).
4. Shmur'yev V.Ya. Tsifrovyye rele zashchity [Digital protection relays]. M.: NTF «Energoprogress». 1999. 56 p.
5. Lyamec Yu.Ya. Materialy Vsesoyuz. nauch.-tekhn. konf. «Sovremennaya relejnaya zashchita elektroenergeticheskikh ob"ektov». Cheboksary. 1991. Pp. 38-41.
6. Lyamec Yu.Ya., Shevcov. V.M. K sintezu fil'trov simmetrichnyh sostavlyayushchih. Ustrojstva relejnoj zashchity i protivooarijnoj avtomatiki energosistem: Tr. VNIIR. Cheboksary. 1985. Pp. 31-40.



7. Hamming R.W. Digital filters, Second Edition. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 07632. 1983. 224 p.
8. Smith Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, San Diego, California. 1999. 664 p.
9. Rabiner L.R., Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1975. 762 p.
10. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A., Topic in mathematical system theory. McGraw-Hill, Inc. 1969. 359 p.

**Дата поступления: 11.12.2025**

**Дата публикации: 24.01.2026**