

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФРОНТА ВОЛНЫ В СИГНАЛЕ

Точность локализации фронта волны напрямую влияет на оценку момента его возникновения и, следовательно, на точность определения места повреждения волновым методом [1–3]. На практике широко используются способы, локализующие фронт волны после превышения контрольным сигналом заданного порога. В связи с тем, что фронт волны сильно зависит от расстояния до короткого замыкания, эти способы имеют низкую точность.

В настоящем докладе предлагается новый способ локализации фронта волны в сигнале, основанный на выделении его высокочастотных составляющих и свободный от недостатков традиционных способов.

В предлагаемом способе (рис. 1) сначала с использованием входных сигналов фазных величин $x_J(k)$, $J = \overline{A, B, C}$ выполняется модальное преобразование [3] (блок MT). После чего, для сигнала $x_g(k)$, имеющего наибольший уровень фронта первой волны [4] (определяется селектором рабочего волнового канала WCS), основным и дополнительным операторами линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала волнового канала (в блоке FLT).

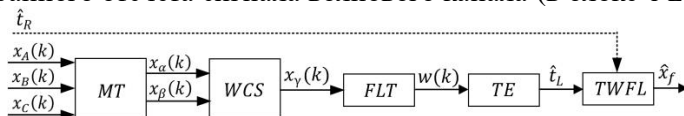


Рис. 1. Структурная схема локализации фронта волны в сигнале: $x_J(k)$, $J = \overline{A, B, C}$ – сигналы фазных величин; MT – блок модального преобразования; $x_a(k)$, $x_b(k)$ – сигналы воздушных волновых каналов; WCS – селектор рабочего волнового канала; $x_g(k)$ – сигнал рабочего волнового канала; FLT , $w(k)$ – итоговый интерполирующий фильтр и сигнал на его выходе; TE – блок оценки момента возникновения фронта волны; \hat{t}_L , \hat{t}_R – оценка момента возникновения фронта волны на собственном и противоположном конце ЛЭП; $TWFL$ – блок определения расстояния до места повреждения

Основная идея заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала. Операторы представляют собой линейные фильтры предсказания вперед и назад, а их АФЧХ выбираются таким образом, чтобы сигналы ошибки операторов были равны и противоположны по знаку. Основной и дополнительный операторы вместе образуют интерполирующий фильтр. Поэтому в отсутствие фронтов волн уровень сигнала на выходе фильтра, представляющего полусумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится фронт волны, то благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет фронта волны вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без отсчета фронта волны. Поэтому ошибка предсказания основного оператора $e_0(k)$ значительно возрастет, а ошибка предсказания дополнительного оператора $e_o(k)$ останется на уровне предсказания отсчета при отсутствии фронта волны. Это приведет к резкому повышению уровня сигнала на выходе фильтра:

$$w(k) = \frac{1}{2} \hat{e}_o(k) + e_o(k) \quad (1)$$

что будет свидетельствовать о возникновении фронта волны на текущем отсчете k .

Операторы используют разные последовательности отсчетов, причем их сдвиг относительно друг друга может осуществляться по-разному [5]. Невязка дополнительного оператора представляет собой инвертированную по знаку невязку основного оператора, вычисленную по последовательности отсчетов со сдвигом на шаг назад. Поэтому АФЧХ невязок основного и дополнительного операторов будут противоположны по знаку и сдвинуты на угол $\alpha = \omega T_s$, равный угловому расстоянию между отсчетами на частоте ω .

Рабочая область частот АФЧХ итогового интерполирующего фильтра (1) [рис. 2] должна располагаться в низкочастотной области – области значительного подавления входного сигнала. Тогда сигнал на выходе итогового фильтра при отсутствии во

входном сигнале фронтов волн будет иметь невысокий уровень небаланса. Это важно, поскольку уровень небаланса влияет на выбор порога, по которому оценивается момент \hat{t}_L возникновения фронта волны (TE на рис. 1), который используется для определения расстояния до места повреждения ($TWFL$ на рис. 1).

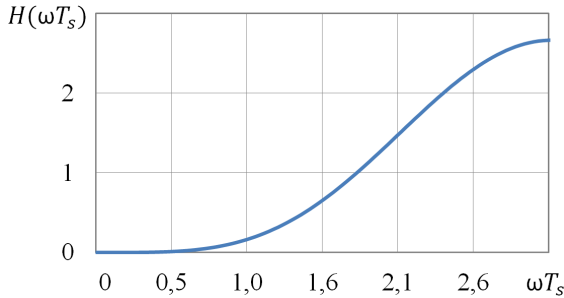


Рис. 2. АЧХ итогового интерполирующего фильтра

Пример. Рассмотрим работу предлагаемого способа локализации фронта волны на примере двустороннего метода волнового ОМП.

Рассматривается однофазное КЗ фазы A при $R_f = 0$ Ом и фазе возникновения КЗ 90° на расстоянии 20 км от места установки полукомплекта волнового ОМП FL_K (рис. 3). Параметры электрической сети: номинальное напряжение электрических систем бесконечной мощности 110 кВ; длина контролируемой ЛЭП $LL_1 = 100$ км, длины примыкающих ЛЭП: $LL_2 = LL_3 = 150$ км, $LL_4 = LL_5 = 200$ км. Все ЛЭП имеют удельные параметры прямой последовательности: $L_1 = 1,320$ мГн/км, $C_1 = 8,715$ нФ/км, $R_1 = 0,160$ Ом/км, удельные параметры нулевой последовательности: $L_0 = 4,140$ мГн/км, $C_0 = 5,828$ нФ/км, $R_0 = 0,308$ Ом/км.

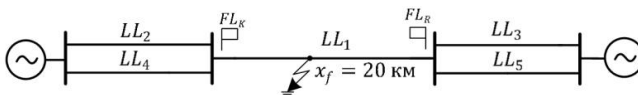


Рис. 3. Схема электрической сети: места установки полукомплектов показаны флажками

Сигналы фазных токов, записанные полукомплектами FL_K и FL_R иллюстрируются на рис. 4.

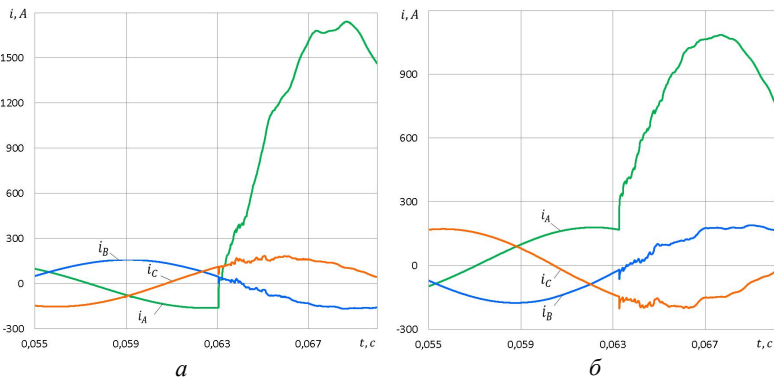


Рис. 4. Фазные токи i_γ , $\gamma = \overline{A, B, C}$ в месте установки полукомплекта волнового ОМП: $FL_K(a)$; $FL_R(b)$

На основе измеренных фазных токов определяется сигнал тока междуфазного волнового канала и сигнал на выходе фильтра (1) (рис. 5).

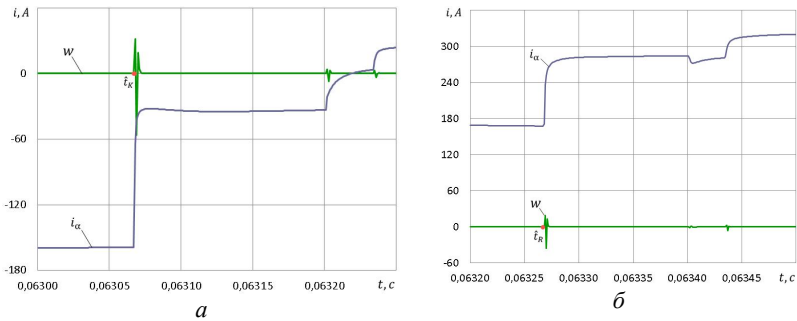


Рис. 5. Сигнал тока i_α междуфазного волнового канала и сигнал невязки предсказания w (сигнал локализованных фронтов волн) определенные полукомплексом волнового ОМП: $FL_K(a)$; $FL_R(b)$

У первых локализованных фронтов волн определяются моменты возникновения: $\hat{t}_K = 0,063066$ с и $\hat{t}_R = 0,063268$ с (рис. 5). После чего рассчитывается расстояние до места повреждения:

$$\hat{x}_f = LL_1/2 - v(\hat{t}_R - \hat{t}_K)/2 = 20,221 \text{ км},$$

где $v = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ – скорость распространения волны по ЛЭП.

Предлагаемый способ в рассматриваемом примере имеет низкую погрешность:

$$Dx_f = x_f - \hat{x}_f = - 221 \text{ м.}$$

Выводы. Предложен новый способ локализации фронта волны в сигнале. Его основная идея заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала. В отсутствие фронтов волн уровень сигнала на выходе фильтра, представляющего сумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится фронт волны, то благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет фронта волны вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без отсчета фронта волны. Это приведет к резкому повышению уровня сигнала на выходе фильтра, что будет свидетельствовать о возникновении фронта волны на текущем отсчете.

Литература

1. Limitations of Traveling Wave Fault Location / A. Fedorov [et al.] // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

2. Fedorov A., Petrov V. S., Naumov V. Theory of single-end traveling wave fault location // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021.

3. Kasztenny B. Improving Line Crew Dispatch Accuracy When Using Traveling-Wave Fault Locators // 46th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington 2019. PP. 1–13.

4. Alekseev V., Petrov V., Naumov V. Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020.

5. Петров В. С. Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ: дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Чебоксары, 2015.