

7. Воробьев В.С. О неправильной работе устройств РЗА в переходных режимах при насыщении трансформаторов тока [Электронный ресурс]. – URL: [http://cigre.ru/research\\_commitets/ik\\_rus/b5\\_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90\\_11.09.2015.pdf](http://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b5_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90_11.09.2015.pdf).
8. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
9. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
10. Тимонин Р.Е., Миролевич А.О., Федосов Д.С. Модель цифровой дифференциальной защиты в MATLAB Simulink с амплитудной и фазовой коррекцией токов плеч // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – Т. 2. – С. 84-89.

Научный руководитель: Д.С. Федосов, к.т.н., доцент кафедры электрических станций, сетей и систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Р.В. Жаркая, М.В. Андреев, А.О. Сулайманов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для обеспечения нормальной работы и уменьшения последствий повреждений служит релейная защита. Однако согласно обобщенной статистике аварийности в мировой электроэнергетике примерно 25% [1] тяжелых аварий являются следствием неправильных действий РЗ и противоаварийной автоматики. Среди главных причин можно выделить две, таких как использование недостаточно полной и актуальной информации при расчете уставок и некорректный учет погрешностей, формируемых конкретными реализациями РЗ.

Первый фактор в настоящее время стремится к минимуму, вследствие развития средств моделирования ЭЭС [1]. В ЭНИН ТПУ реализуется проект, направленный на ликвидацию второго фактора. Для этого созданы и создаются математические модели средств РЗ [2], учитывающие ключевые особенности конкретных аппаратных реализаций РЗ. В рамках этого проекта создана модель фильтра низких частот (ФНЧ) третьего порядка, который используется в некоторых современных РЗ. Фрагменты результатов исследований представлены ниже.

Для синтеза математической модели ФНЧ (рис.1) использован метод направленных графов и формула Мэсона [3], позволяющие получить передаточную функцию фильтра. Направленный граф представлен на рис.2. При помощи этих инструментов составлена передаточная функция (1), описывающая протекающие в ФНЧ процессы.

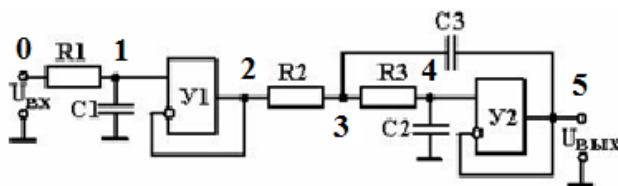


Рис. 1. Схема ФНЧ

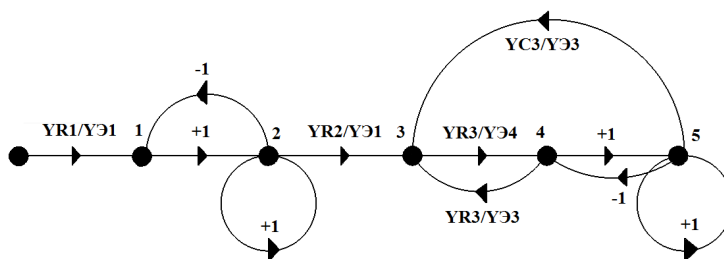


Рис. 2. Граф ФНЧ

Передаточная функция (1):

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = W(j\omega) = \frac{\left(\frac{Y_{R1}}{Y_{Э1}}\right) \cdot (1) \cdot \left(\frac{Y_{R2}}{Y_{Э1}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot (1)}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_2 + \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_3} \quad (1)$$

где

$$\Delta_1 = 1 \cdot (-1) + (+1) + \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) + 1 \cdot (-1) + \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{C3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot (1) + 1 \quad (2)$$

$$\Delta_2 = 1 \cdot (-1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) + 1 \cdot (-1) \cdot 1 \cdot (-1) + 1 \cdot (-1) \cdot (+1) + 1 \cdot (-1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{C3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot (+1) \quad (3)$$

$$\Delta_2 = (+1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) + (+1) \cdot 1 \cdot (-1) + (+1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{C3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot 1 + (+1) \cdot (+1) \quad (4)$$

$$\Delta_3 = \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot (+1) \quad (5)$$

$$\Delta_3 = 1 \cdot (-1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot (+1) \quad (6)$$

$$\Delta_3 = (+1) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э4}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{R3}}{Y_{Э3}}\right) \cdot (+1) \quad (7)$$

После упрощения получаем (8):

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = W(j\omega) = \frac{-Y_{R1} \cdot Y_{R2} \cdot Y_{R3}}{Y_{Э1} \cdot (Y_{R3} \cdot Y_{C3} - Y_{Э3} \cdot Y_{Э4})} \quad (8)$$

По стандартным методикам рассчитываем и выбираем параметры ФНЧ: R1=12,03 кОм, R2=11,51 кОм, R3=22,33 кОм, C1=100 нФ, C2=47 нФ, C3=100

нФ. По этим данным получить частоту среза 100 Гц, что являлось желаемым результатом, не удастся. Используя математическую модель, подбором параметра  $C1$  получаем необходимые характеристики ФНЧ. При  $C1=1$  нФ получаем следующую передаточную функцию (9)

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = W(p) = \frac{6,47}{9,4 \cdot 10^{47} p^3 + 7,94 \cdot 10^{52} p^2 + 1,04 \cdot 10^{56} p + 9,80 \cdot 10^{58}} \quad (9)$$

На основании выведенной передаточной функции (9) построены АЧХ (рис. 3) и ФЧХ (рис. 4) при помощи программы Mathcad.

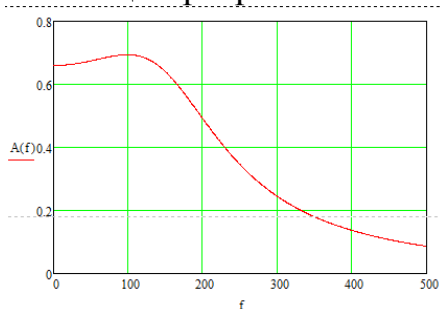


Рис. 3. Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика ФНЧ

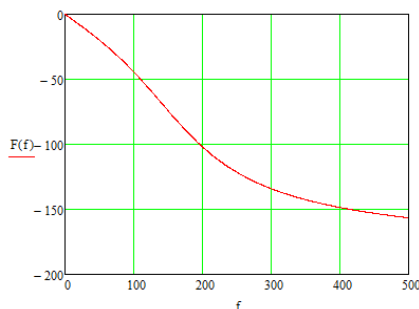


Рис. 4. Экспериментально полученная фазочастотная характеристика ФНЧ

Сравнивая экспериментально полученные характеристики с рисунками теоретических характеристик, доступными в открытых литературных источниках, можно заметить соответствие.

Адекватность полученной математической модели фильтра ФНЧ исследовали с помощью программного обеспечения MATLAB: создан сигнал с основной частотой 50 Гц, который был искажен с помощью сложения с гармоническими сигналами 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц и 500 Гц. На выходе получился отфильтрованный гармонический сигнал (рис. 5).

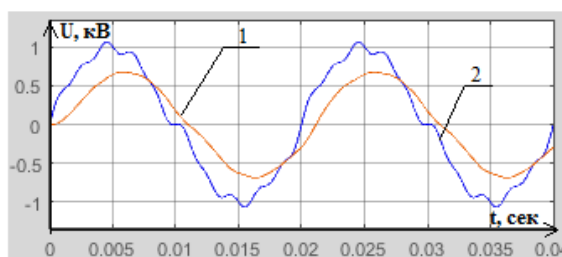


Рис. 5. Осциллограммы, полученные в программе MATLAB и отображающие входной суммированный (2) и выходной отфильтрованный гармонический (1) сигналы

Для дополнительной проверки проведены аналогичные исследования в программе MathCAD. Результаты Вы может наблюдать на рис. 6

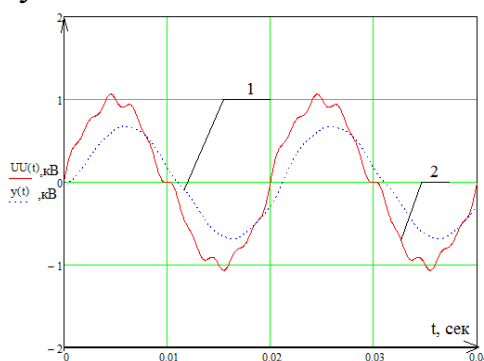


Рис. 6. Осциллограммы, полученные в программе MathCAD отображающие входной суммированный (2) и выходной отфильтрованный гармонический (1) сигналы

Характеристики на рис. 5 и 6 еще раз доказывают адекватность созданной математической модели ФНЧ, а также подтверждают эффективность указанного ранее подхода к моделированию РЗ.

В ходе проведенных исследований удалось проанализировать амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики ФНЧ с учетом подобранных параметров, проверить правильность работы модели фильтра. Результаты представленного небольшого исследования станут вкладом в большую исследовательскую работу по изучению влияния переходных процессов в ЭЭС на функционирование РЗ и разработке методики их адекватной всережимной настройки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука», проект №3901: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Li Qi, S. Woodruff, M. Steurer. Study of Power Loss of Small Time-Step VSC Model in RTDS, Power Engineering Society General Meeting, 2007, IEEE, Tampa, FL, 24-28 June 2007, pp. 1-7.
2. Андреев М.В., Боровиков Ю.С. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с

помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. – №3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9343>, свободный, 11.06.2013.

3. Абрахамс, Дж. Анализ электрических цепей методом графов : пер. с англ. / Дж. Абрахамс, Дж. Каверли. — Москва: Мир, 1967. — С .175

Научный руководитель: М.В. Андреев, доцент каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ.

## **САМООБУЧАЮЩАЯСЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ УЧАСТКА СЕТИ**

Н.И. Ежиков, К.В. Желнина

Южно-Уральский государственный университет

При введении в электросистему нового потребителя крайне важно правильно рассчитать его защиту по множеству параметров, таких как максимальный ток, максимальное и минимальное напряжение, частота, и другие, что является весьма трудоемкой операцией как с точки зрения расчета, так и с точки зрения настройки микропроцессорной системы защиты либо настройки релейной схемы. Также при каких-либо изменениях в потребителе электроэнергии возникает необходимость проведения новых расчетов и перенастройки систем защиты.

Данные затраты можно свести к минимуму используя самообучающуюся систему, которая в течении всего периода работы анализирует ток, напряжение и другие параметры и подстраивает при необходимости свои уставки.

Во время работы данной системы можно выделить три этапа: первичная настройка, нормальный режим работы, режим сигнализации и аварийный режим работы.

Первичная настройка заключается в использовании максимально доступного числа режимов потребления электроэнергии защищаемым потребителем для «узнавания» системой защиты допустимых значений токов, напряжений и других параметров. При модернизации уже имеющейся системы защиты наиболее целесообразно вручную ввести предыдущие параметры. После данного этапа необходимо вручную перевести систему в режим работы.

Нормальный режим работы заключается в непрерывном анализе всех необходимых параметров (ток, напряжение, частота и др.) и сборе статистики. При небольшом выходе значений параметров из допустимого диапазона подается сигнал диспетчеру, который сообщает устройству защиты является ли данное превышение разовым незначительным, либо частью нормального режима работы, либо аварией. При отсутствии реакции диспетчера целесообразно считать данное небольшое превышение разовым незначительным. При значительном превышении допустимых пределов система защиты отключает потребителя и выдает сигнал аварии диспетчеру. Диспетчер так же может сообщить системе о том, что данное превышение не является аварийным, в таком случае начальные допустимые диапазоны параметров будут изменены. При аварийном режиме