

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»  
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы  
III Международной научно-технической  
конференции**

Чебоксары  
2019

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43  
П78

*Редакционная коллегия:*

**В.Г. Ковалев**, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);  
**Г.С. Нудельман**, канд. техн. наук, профессор;  
**В.А. Щедрин**, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);  
**В.В. Афанасьев**, д-р техн. наук, профессор;  
**Ю.М. Миронов**, д-р техн. наук, профессор;  
**Г.П. Свинцов**, д-р техн. наук, профессор;  
**А.А. Ильин**, канд. техн. наук, доцент;  
**О.А. Онисова**, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета  
Чувашского государственного университета*

**П78 Проблемы** и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43

© Издательство  
Чувашского университета, 2019

## ЛИТЕРАТУРА

*Костенко М.В.* Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.В. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. 272 с.

### **Авторы:**

**Подшивалин Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий отделом, ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2004 г. Защитил диссертацию в 2005 г. на тему «Метод информационного анализа и его приложение к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи». E-mail: podshivalin\_an@relematika.ru

**Исмукوف Григорий Николаевич**, инженер-исследователь 1 категории ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2012 г. E-mail: gismukov@mail.ru.

**Чернов Александр Юрьевич**, студент ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь 3 категории ООО «Релематика». E-mail: sasha-chernov96@inbox.ru.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЯ ПУСКА АВТОМАТИКИ ФИКСАЦИИ ТЯЖЕСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

**Алексеев В.С., Петров В.С.**, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

**Аннотация.** Цифровая автоматика фиксации тяжести короткого замыкания (АФТКЗ) использует в качестве условия пуска при коротком замыкании (КЗ) резкое увеличение приращения тока обратной последовательности. Отклонение частоты от номинальной, особенно асинхронный режим, вызывают увеличение погрешности тракта аналого-цифрового преобразования АФТКЗ. В связи чем правильная идентификация режима КЗ в АФТКЗ требует отстройки пускового органа по приращению тока обратной последовательности от небалансов, вызванных упомянутыми режимами.

В настоящей работе изложены предлагаемые авторами рекомендации по применению пускового органа АФТКЗ по приращению тока обратной последовательности.

**Ключевые слова:** автоматика фиксации тяжести короткого замыкания, пусковой орган, асинхронный режим.

### **Введение**

Устройства АФТКЗ предназначены для оценки тяжести КЗ, близких к шинам электростанции и способных привести к нарушению динамической устойчивости генераторов [1]. Пуск АФТКЗ должен осуществляться при определении КЗ, например, по факту резкого приращения тока обратной последовательности  $dI_2$ . Причем к резким приращениям нужно относить все приращения, уровень которых выше максимального приращения, возможного в асинхронном режиме (АР). Это связано с тем, что в АР погрешности цифровых фильтров АФТКЗ достигают наибольшего уровня и приводят к ложному увеличению оценки приращения тока обратной последовательности.

### **Основная часть**

Принимая, что в АР входные токи содержат две слагаемые частоты  $f_{nom}$  и  $f_{nom} \pm f_{smax}$  (токи от источников  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  на рис. 1), где  $f_{smax}$  – максимальная частота скольжения, оценка тока обратной последовательности при использовании фильтра ортогональных составляющих:

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_{2E1} + \hat{I}_{2E2\Delta} + \hat{I}_{2E2\Sigma}, \quad (1)$$

где  $\hat{I}_{2E1}$  – оценка тока обратной последовательности от источника ЭДС  $\underline{E}_1$ ;  $\hat{I}_{2E2\Delta}$  – оценка тока обратной последовательности от источника ЭДС  $\underline{E}_2$  частоты  $\omega_\Delta = \omega - \omega_0$ ;  $\hat{I}_{2E2\Sigma}$  – оценка тока обратной последовательности от источника ЭДС  $\underline{E}_2$  частоты  $\omega_\Sigma = \omega + \omega_0$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_{nom}$ .

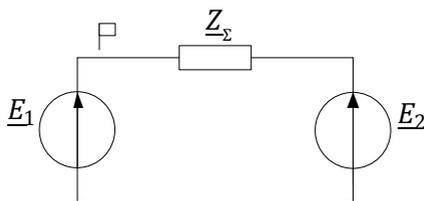


Рис. 1. Расчётная схема замещения энергосистемы:  $\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$  – эквивалентные ЭДС систем,  $\underline{Z}_\Sigma$  – эквивалентное сопротивление электропередачи, флажком обозначено место установки устройства АФТКЗ

Поскольку составляющая тока обратной последовательности от источника ЭДС  $\underline{E}_1$  номинальной частоты, то она удаляется фильтром-дифференциатором, используемым для оценки приращения, и, следовательно, модуль выходного сигнала дифференциатора будет определяться током от источника ненормальной частоты  $\underline{E}_2$ :

$$dI_2 = H_{dl}(\omega_\Delta) \hat{I}_{2E2\Delta} + H_{dl}(\omega_\Sigma) \hat{I}_{2E2\Sigma}, \quad (2)$$

где  $H_{dl}(\omega) = e^{-j\omega k T_s} \left( 1 - 2e^{j\omega \frac{N}{2} T_s} + e^{j\omega N T_s} \right)$  – АФЧХ дифференциатора;  $N = \frac{1}{T_s f_{nom}}$  – количество отсчетов за период промышленной частоты;  $T_s$  – частота дискретизации.

Зададимся условием достижения максимального тока обратной последовательности в АР: примем ток фазы  $A$   $I_A$  равным максимальному фазному току в АР  $I_{ps\max}$  и токи фаз  $B$   $I_B$  и  $C$   $I_C$  равными  $I_{ps\max} - 3I_{2ps}$ , где  $I_{2ps}$  – максимальный ток обратной последовательности, обусловленный несимметрией в системе при токе  $I_{ps\max}$ , получим составляющие тока от источника ЭДС  $\underline{E}_2$ :

$$\hat{I}_{2E2\Delta} = \frac{\hat{I}_{E2A\Delta} - \hat{I}_{E2\Delta}}{3} = qH_M(\omega_\Delta) \left[ \frac{\varepsilon_{ps} I_{ps\max}}{300} + I_{2ps} \right];$$

$$\hat{I}_{2E2\Sigma} = \frac{\hat{I}_{E2A\Sigma} + 2\hat{I}_{E2\Sigma}}{3} = qH_M(\omega_\Sigma) \left[ \left( 1 + \frac{\varepsilon_{ps}}{300} \right) I_{ps\max} - 2I_{2ps} \right],$$

где  $\hat{I}_{E2\Delta} = qH_M(\omega_\Delta) [I_{ps\max} - 3I_{2ps}]$  – оценка тока в фазах  $B$  и  $C$  частоты  $\omega_\Delta$ ;  $\hat{I}_{E2\Sigma} = qH_M(\omega_\Sigma) [I_{ps\max} - 3I_{2ps}]$  – оценка тока в фазах  $B$  и  $C$  частоты  $\omega_\Sigma$ ;  $\hat{I}_{E2A\Delta} = qH_M(\omega_\Delta) \left[ 1 + \frac{\varepsilon_{ps}}{100} \right] I_{ps\max}$  – оценка тока в фазе  $A$  частоты  $\omega_\Delta$ ;  $\hat{I}_{E2A\Sigma} = qH_M(\omega_\Sigma) \left[ 1 + \frac{\varepsilon_{ps}}{100} \right] I_{ps\max}$  – оценка тока в фазе  $A$  частоты  $\omega_\Sigma$ ;  $q = [0; 1]$  – коэффициент соотношения;

$H_M(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-jk\omega T_s}$  – АФЧХ оператора скользящего среднего в

составе фильтра ортогональных составляющих;  $\varepsilon_{ps}$  – относительная погрешность трансформаторов тока, определяется для случая, когда один из трансформаторов тока имеет наибольшую погрешность, а другие работают без погрешности. По умолчанию принимается равной 10% (если ток в асинхронном режиме не превосходит тока, соответствующего 10%-ной погрешности) или рассчитывается более точно – по кривым намагничивания трансформатора тока [2]. Принимается, что погрешность первичных трансформаторов тока сказывается только в измерении тока фазы А:

$$I_A = \left(1 + \frac{\varepsilon_{ps}}{100}\right) I_{ps \max}.$$

Величина  $I_{ps \max}$  возникает при синфазности токов от источников  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  в фазе А, а величина  $I_{ps \min}$  (максимальный из минимальных фазных токов в АР) при их противофазности:

$$\begin{cases} I_{ps \max} = I_{E_{1A}} + I_{E_{2A}}; \\ I_{ps \min} = I_{E_{2A}} - I_{E_{1A}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_{E_{1A}}$  – ток фазы А от источника  $\underline{E}_1$ ;  $I_{E_{2A}}$  – ток фазы А от источника  $\underline{E}_2$ .

Сложив равенства системы (3), получим

$$I_{E_{2A}} = \frac{I_{ps \max} + I_{ps \min}}{2}. \quad (4)$$

Поскольку

$$I_{E_{2A}} = q I_{ps \max},$$

то из (4) получим

$$q = \frac{I_{ps \max} + I_{ps \min}}{2 I_{ps \max}}. \quad (5)$$

Тогда оценка приращения тока обратной последовательности:

$$dI_2 = \frac{I_{ps \max} + I_{ps \min}}{2 I_{ps \max} I_{nom}} \left( k_\Delta \left[ \frac{\varepsilon_{ps} I_{ps \max}}{300} + I_{2ps} \right] + k_\Sigma \left[ \left( 1 + \frac{\varepsilon_{ps}}{300} \right) I_{ps \max} - 2 I_{2ps} \right] \right),$$

где  $k_\Delta$ ,  $k_\Sigma$  коэффициенты передач цифрового фильтра, определяются из таблицы при  $f_\Delta = |\omega_0 - \omega|$ .

Таблица

Коэффициенты передач цифрового фильтра

$f_{\Delta}$ , Гц	0	1	2	3	4	5
$k_{\Delta}$	0	0,004	0,016	0,04	0,06	0,1
$k_{\Sigma}$	0	$4 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,003	0,005

### **Выводы**

В работе даны практические рекомендации по настройке пускового органа устройства АФТКЗ, учитывающие влияние отклонения частоты входных сигналов от номинальной частоты, а также погрешностей измерительных ТТ на оценку приращения тока обратной последовательности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007- 33.040.20.204-2015 Типовые функции цифровых устройств противоаварийной автоматики ФСМ, ФТКЗ, АЧР, ЧАПВ, ЧДА, КНР, САОН, АОПО, АРПМ, ПАО «ФСК ЕЭС».

2. Руководящие указания по релейной защите, выпуск 7. Дистанционная защита линий 35-330 кВ. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

3. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16с.

### **Авторы:**

*Алексеев Валерий Сергеевич, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2018 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».*

*Петров Владимир Сергеевич, руководитель группы научного сопровождения внешних НИОКР департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил в 2010 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ».*