

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  
XIII Всероссийской научно-технической  
конференции**

---

---

**ДНДС–2019**

---

---

ЧЕБОКСАРЫ

2019

УДК 681.511.42.033(082)

Д44

**Редакционная коллегия:**

ректор 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 13-й Всерос. науч.-техн.  
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. 478 с.

ISBN 978-5-7677-2925-8

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 681.511.42.033(082)

© Издательство

ISBN 978-5-7677-2925-8

Чувашского университета, 2019

## Литература

1. Tierney D. et al. Performance of generator protection relays during off-nominal frequency operation // 2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2014. – PP. 450–469.

2. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и её приложения в интеллектуальной электроэнергетике. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018.

3. Антонов В.И., Наумов В.А., Шевцов В.М. Оценка частоты электрической сети: теоретические основы и практические алгоритмы // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. ст. – Выпуск 1. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2012.

4. Антонов В.И. и др. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1. – С.16–25.

5. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов В.А., Иванов Н.Г. Общие закономерности фильтров ортогональных составляющих электрического сигнала // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 238–240.

Алексеев В.С., Петров В.С.  
(Чебоксары, ЧГУ, ООО НПП «ЭКРА»)

## ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НА ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ АЛАР

В устройствах автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР) на дистанционном принципе контролируемым параметром является сопротивление (рис. 1)

$$\underline{Z} = \frac{U}{I},$$

где  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}$  – напряжение и ток в месте установки устройства.

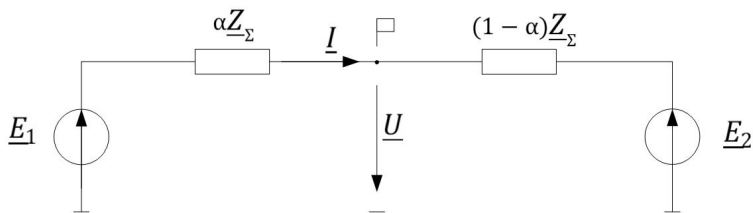


Рис. 1. Расчётная схема замещения энергосистемы:

$\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$  – ЭДС систем;  $\underline{Z}_S$  – эквивалентное сопротивление электропередачи;  $\alpha$  – относительное электрическое удаление от ЭДС  $\underline{E}_1$  ( $\alpha \leq 1$ ); флажком обозначено место установки устройства АЛАР

На комплексной плоскости сопротивления характеристика срабатывания устройства АЛАР настраивается таким образом, чтобы охватывать годографы с электрическим центром качания (ЭЦК) на контролируемом сечении (годограф А на рис. 2) [1].

В связи с тем, что погрешности измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также погрешности фильтра ортогональных составляющих (ФОС) в АЛАР изменяют положение годографа на комплексной плоскости, то устройство АЛАР может не сработать при расположении ЭЦК на контролируемом сечении (годографы В и С на рис. 2).

Характеристика срабатывания АЛАР строится симметрично относительно линии, проходящей через вектор  $\underline{Z}_S$  (рис. 2), и она должна охватывать годографы всех возможных АР с ЭЦК на контролируемом сечении. Закон изменения годографа сопротивления без погрешностей представляется выражением

$$\underline{Z}(t) = \underline{Z}_S \frac{1}{1 - \frac{q e^{j(\delta - w_s t)}}{q}} \quad (1)$$

где  $w_s t = 2\pi(f_2 - f_1)t$  – частота скольжения,  $\delta$  – угол между ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ ,  $q = E_1/E_2$  – отношение модулей эквивалентных ЭДС. Если модули ЭДС источников варьируются в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального напряжения, то  $q = [0,82; 1,22]$  [2].

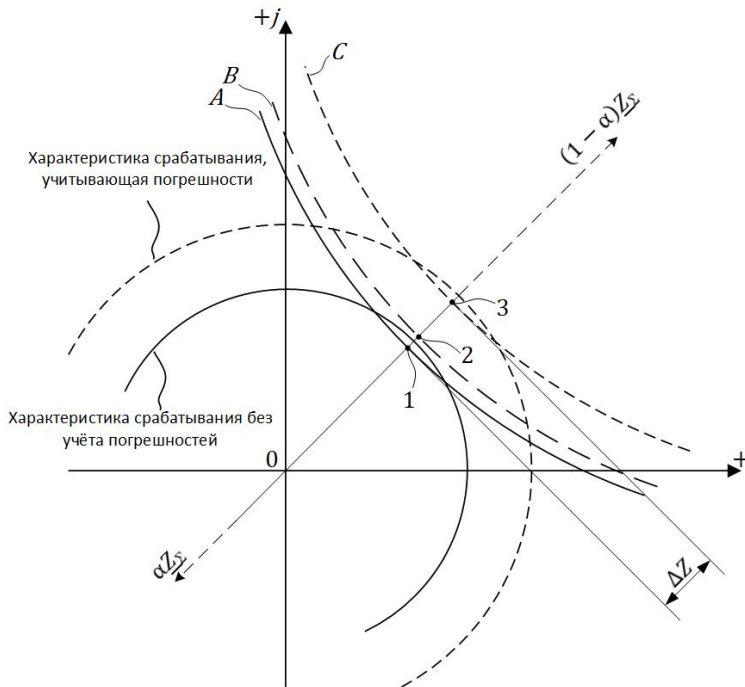


Рис. 2. Годографы сопротивления при ЭЦК на контролируемом сечении: *A* – без учёта погрешностей; *B* – с учётом погрешностей ФОС; *C* – с учётом погрешностей ФОС и измерительных трансформаторов

Погрешности ФОС сдвигают положение годографа сопротивления на комплексной плоскости (годограф, проходящий через точку 2 на рис. 2). При этом новое положение годографа соответствует отношению  $\frac{E_1}{E_2}$ , равному  $qk(t)$ . Погрешности ТН и

ТТ также вносят вклад в смещение годографа, сдвигая его пропорционально отношению погрешности ТН к погрешности ТТ (годограф, проходящий через точку 3 на рис. 2). Тогда

$$\underline{Z}(t) = k_s Z_s \frac{1}{1 - \frac{1}{qk(t)}} - a, \quad (2)$$

где  $k_t = \frac{k_{vt}}{k_{ct}} = \frac{100 \pm e_{vt}}{100 \pm e_{ct}}$  – коэффициент, учитывающий погрешности ТТ и ТН;  $e_{vt}$  – максимальная относительная погрешность измерительных трансформаторов напряжения, %;  $e_{ct}$  – максимальная относительная погрешность измерительных трансформаторов тока, %;

$$k(t) = \frac{k_1^{E_1} e^{j(w_{1D}t + j_1^{E_1})} - n_{ph} k_2^{E_1} e^{-j(w_{1S}t + j_2^{E_1} + y)}}{k_1^{E_2} e^{j(w_{2D}t + j_1^{E_2})} - n_{ph} k_2^{E_2} e^{-j(w_{2S}t + j_2^{E_2} + y)}}$$

– коэффициент, учитывающий погрешности ФОС;

$$w_{1D} = 2p(f_1 - f_{nom}), \quad w_{2D} = 2p(f_2 - f_{nom});$$

– разностные частоты составляющих, возникающих на выходе ФОС;  $w_{1S} = 2p(f_1 + f_{nom}), w_{2S} = 2p(f_2 + f_{nom})$  – суммарные частоты составляющих, возникающих на выходе ФОС;  $f_1, f_2$  – частота источника  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ , соответственно;  $f_{nom}$  – номинальная частота;

$k_1^{E_1}, k_2^{E_1}, k_1^{E_2}, k_2^{E_2}$  – коэффициенты ФОС, на частоте  $w_{1D}$ ,  $w_{1S}$  и  $w_{2D}$ ,  $w_{2S}$ , соответственно;  $j_1^{E_1}, j_2^{E_1}, j_1^{E_2}, j_2^{E_2}$  – сдвиги по фазе, определяемые по ФЧХ фильтра скользящего среднего, входящего в состав ФОС, при частотах  $w_{1D}$ ,  $w_{1S}$  и  $w_{2D}$ ,  $w_{2S}$ ,

соответственно;  $y = 0; \frac{p}{3}$  – при оценке фазного и междуфазного сопротивлений соответственно;  $n_{ph} = 1$  – при оценке фазного и междуфазного сопротивлений;  $n_{ph} = 0$  – при оценке сопротивления прямой последовательности;

$$\underline{H}_M(jw) = \frac{1}{N} \overset{\circ}{\underset{k=0}{\mathbf{a}}}_N e^{-jkwT_s}$$

– АФЧХ фильтра скользящего среднего в составе ФОС;  $w = 2pf$  – циклическая частота;  $k$  – номер отсчёта;  $T_s$  – частота дискретизации.

При этом наибольшее удаление годографа (2) от годографа (1) на линии, проходящей через  $\underline{Z}_S$  соответствует условиям, приведённым в таблице.

### Условия наибольшего смещения годографа

Наибольшее смещение на комплексной плоскости	
Вверх	Вниз
$q = q_{\max} = 1,22$	$q = q_{\min} = 0,82$
$\alpha=0$	$\alpha=1$
$f_1 = f_{\text{nom}}, f_2 = f_{\text{nom}} - Df$	$f_1 = f_{\text{nom}} - Df, f_2 = f_{\text{nom}}$
$\Delta f = 10 \text{ Гц}$	
$k=1,2$ – при контроле фазного и междуфазного сопротивлений $k=1,07$ – при контроле сопротивления прямой последовательности	$k=0,83$ – при контроле фазного и междуфазного сопротивлений $k=0,94$ – при контроле сопротивления прямой последовательности
$k_t = k_{t\max} = 1,18$	

В связи с тем, что составляющие суммарной частоты представляет собой обратную последовательность, то при прохождении через фильтр прямой последовательности они удаляются. Это приводит к тому, что оценка сопротивления прямой последовательности будет иметь меньшее смещение ( $DZ^{(1)} = 0,12Z_S$ ), чем оценки фазного и междуфазного сопротивлений ( $DZ = 0,15Z_S$ ).

Испытания предложенной методики подтвердили её корректность. На рис. 3 и 4 показан пример возникновения АР после ликвидации трехфазного КЗ длительностью 0,2 с на линии Л-2 вблизи ПС №1. В опыте АЛАР при ЭЦК на контролируемом сечении охватывает характеристикой срабатывания годограф сопротивления даже при частоте скольжения до 10 Гц.

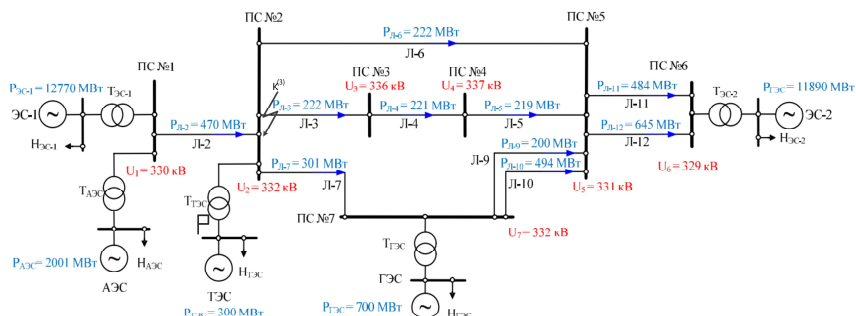


Рис. 3. Схема тестовой ЭЭС

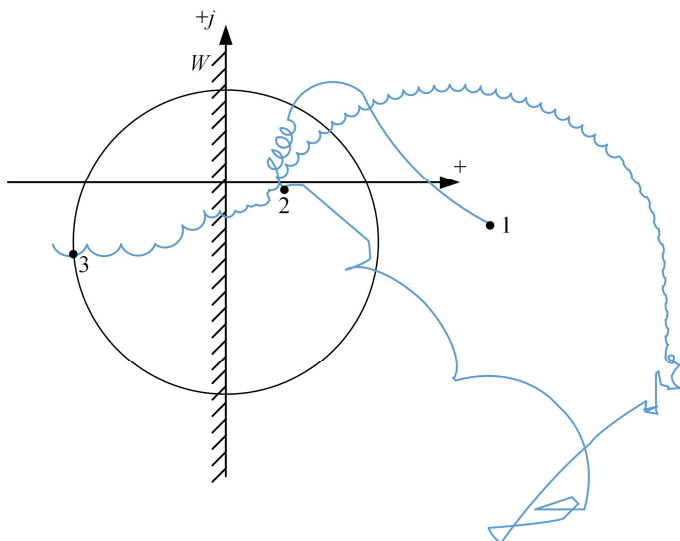


Рис. 4. Результаты испытания: 1 – нагрузочный режим; 2 – ликвидация КЗ; 3 – момент срабатывания АЛАР

Поскольку в оценке сопротивления прямой последовательности отсутствует составляющая суммарной частоты, порождаемая ФОС, она имеет меньшую методическую погрешность, чем оценки фазного и междуфазного сопротивлений. Следовательно, в устройствах АЛАР по сопротивлению рекомендуется использовать в качестве контролируемого параметра сопротивление прямой последовательности.

#### Литература

1. Принципиальные схемы устройств автоматического прекращения асинхронного хода, типовые материалы для проектирования. – М.: Энергосетьпроект, 1988.

2. Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С. Автоматика ликвидации асинхронного режима. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.



<i>Александрова М.И., Наумов В.А., Антонов В.И., Иванов Н.Г.</i> Универсальный метод определения оптимальных условий управляемого включения трехфазного шунтирующего реактора.....	330
<i>Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г., Глазырин А.В.</i> Мониторинг частоты в цифровых системах релейной защиты и автоматики на основе фильтров ортогональных составляющих.....	337
<i>Алексеев В.С., Петров В.С.</i> Влияние погрешностей измерения на выбор характеристики срабатывания АЛАР.....	342
<i>Никитина А.Н., Петров В.С.</i> Способ ликвидации асинхронного режима при электрическом центре качания в месте установки устройства.....	348
<i>Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г.</i> Воспроизведение первичного напряжения.....	351
<i>Попов М.Г., Захарова Е.В., Васильева О.А., Шахова М.А.</i> Анализ характеристического уравнения эквивалентной энергосистемы.....	355
<i>Коцеев М.И., Славутский Л.А.</i> Возможность использования простых нейросетей для определения места повреждения в энергосистеме.....	357
<i>Моисеев Д.В., Галанина Н.А.</i> СИМ-модель энергообъектов как инструмент интеграции централизованной системы диагностики устройств РЗА.....	361
<i>Тошходжаева М.И.</i> Перспективы применения современных устройств релейной защиты на воздушных линиях Согдийской энергосистемы.....	363
<i>Мисбахов Рин.Ш.</i> Комбинированные волоконно-оптические системы мониторинга температуры ЛЭП на основе нелинейного рассеяния и адресных брэгговских структур.....	367
<i>Мисбахов Рин.Ш., Васёв А.Н.</i> Волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда.....	369
<i>Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Зайцев Ю.В., Рыбаков Д.А.</i> Система оперативного оповещения при прорывах грунтовых плотин энергообъектов.....	371
<i>Хренников А.Ю., Александров Н.М.</i> Оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов.....	378

*Научное издание*

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции

Публикуются в авторской редакции  
Отв. за выпуск А.В. Серебрянников

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 октября 2010 года  
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 04.06.19. Формат 60×84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Гарнитура Times.  
Усл. печ. л. 27,7. Уч.-изд. л. 26,5. Тираж 300 экз. Заказ 696.

Издательство Чувашского университета  
Типография университета  
428015 Чебоксары, Московский просп., 15