

На правах рукописи



004617117

Танфильев Олег Вадимович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИКИ  
ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО ХОДА ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ  
НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

– 9 ДЕК 2010

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Глазырин Владимир Евлампиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Лизалек Николай Николаевич  
кандидат технических наук, доцент  
Вайнштейн Роберт Александрович

Ведущая организация: ЗАО «Сибэнергосетьпроект», г. Новосибирск

Защита состоится: 23 декабря 2010 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «12» ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тимофеев И.П.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Одним из наиболее тяжелых режимов работы электроэнергетических систем является асинхронный режим, который возникает в результате нарушения синхронной работы частей энергосистемы или, как частный случай, генераторов различных электрических станций. В асинхронном режиме возникают недопустимые колебания напряжения в узлах нагрузок, что, как следствие, приводит к отключению потребителей вне зависимости от их категории и важности. Такие нарушения питания могут приводить к значительным экономическим ущербам, связанным с недоотпуском электроэнергии, а также с повышенным риском возникновения большого количества брака при производстве. В процессе асинхронного режима между несинхронно работающими частями энергосистемы возникают уравнивающие токи, соизмеримые с токами короткого замыкания. Колебания напряжений и токов в асинхронном режиме приводят к периодическим изменениям перетоков активной и реактивной мощностей с частотой скольжения. Амплитуда изменения этих мощностей может существенно превышать перетоки нормальных режимов оборудования электропередачи и генераторов. Возникающие при этом накопительные механические моменты представляют большую опасность для генерирующего оборудования электрических станций.

Одним из средств прекращения асинхронных режимов в электроэнергетических системах являются устройства автоматической ликвидации асинхронных режимов. Автоматика ликвидации асинхронных режимов (АЛАР) является одним из самых сложных видов противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. В настоящее время разработаны устройства и алгоритмы, позволяющие достаточно эффективно выявлять асинхронные режимы (АР) в симметричных режимах.

Выявление АР в несимметричных режимах является более сложной задачей, которая в полной мере до сих пор не решена. Для выявления асинхронного режима при наличии несимметрии в сети в настоящее время используются только простейшие алгоритмы, не обладающие достаточной эффективностью.

Современные микропроцессорные средства и прогрессивные методы параллельной обработки информации открывают широкие возможности для улучшения существующих алгоритмов выявления АР, а также создают предпосылки для создания новых, универсальных алгоритмов, обеспечивающих эффективное выявление АР как в симметричных, так и в несимметричных режимах.

В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритмов и адаптивных устройств АЛАР, обеспечивающих селективное выявление АР при наличии несимметрии.

**Целью работы** является разработка принципов действия и алгоритмов работы АЛАР, позволяющих эффективно выявлять асинхронные режимы работы, как в симметричных режимах энергосистемы, так и при наличии несимметрии.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Аналитическое определение закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в условиях несимметричного АР для простейшей двухмашинной системы.

2. Определение закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в условиях несимметричного АР для сложной многомашинной энергосистемы.

3. Разработка методики определения комплексных значений токов и напряжений на основании измеряемых мгновенных значений входных величин при отклонениях частоты входного сигнала, достигающих  $\pm 10$  Гц.

4. Разработка принципов построения устройства АЛАР и их алгоритмов работы для неполнофазных режимов.

5. Проверка работоспособности предложенных алгоритмов устройства АЛАР на электродинамической модели.

**Методы исследования.** Разработанные в диссертации научные положения основываются на применении теоретических и экспериментальных методов исследования в этой области. Решение поставленных в работе задач базируется на положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как теория функций комплексных переменных, теория фильтров, теория распознавания образов, цифровая обработка сигналов, теоретические основы электротехники.

**Достоверность** и обоснованность основных научных положений и выводов работы подтверждаются теоретическими обоснованиями, совпадением результатов расчетов режимов и результатов экспериментов на электродинамической модели. Обоснованность результатов работы подтверждает практика их успешного использования в комплексах АЛАР, установленных на ПС «ГП ТЭС» и «Курортная» «Алтайэнерго», филиал БЭС, ПС «ОГОК» и ПС «Турга» «Читаэнерго», Филиал МРСК.

#### **Научная новизна работы.**

1. Предложен способ выявления АР на основе измерения сопротивления прямой последовательности и скорости его изменения, позволяющий распознавать АР как в симметричных режимах, так и в условиях несимметрии.

2. Предложена методика выявления АР, а также методика отстройки от синхронных качаний и коротких замыканий, основанная на применении методов теории распознавания образов.

3. Разработан частотно-независимый алгоритм определения комплексных значений токов и напряжений на основании измеряемых мгновенных значений входных параметров.

4. Разработаны принципы построения и алгоритмы работы системы АЛАР для выявления АР в условиях неполнофазного режима.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

1. Разработанный в диссертационной работе алгоритм выявления неполнофазных асинхронных ходов позволяет существенно расширить функциональные возможности устройств АЛАР, обеспечивает селективную работу АЛАР в неполнофазных режимах.

2. Разработанные алгоритмы и положения используются в системах АЛАР, установленных на ПС «ГП ТЭС» и «Курортная» «Алтайэнерго», филиал БЭС, ПС «ОГОК» и ПС «Турга» «Читаэнерго», Филиал МРСК.

Эти системы позволяют существенно повысить надежность функционирования энергосистемы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методические основы построения алгоритмов работы АЛАР для работы в условиях неполнофазных режимов с использованием в качестве основных параметров сопротивления прямой последовательности и скорости его изменения.

2. Методы и обобщенные результаты анализа закономерностей изменения сопротивления прямой последовательности в условиях неполнофазных АР в простейшей и в сложной многомашинной энергосистеме.

3. Частотно – независимый алгоритм определения комплексных значений токов и напряжений на основании измеряемых мгновенных значений входных параметров.

4. Принципы построения и алгоритмы устройств АЛАР, работающих как в симметричных режимах, так и в условиях несимметрии.

5. Методика выявления асинхронного режима, отстройки от синхронных качаний и коротких замыканий на основе методов теории распознавания образов.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электрических станций НГТУ; на всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» в декабре 2009, г. Новосибирск; на всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» в декабре 2009, г. Томск; на международной научно-технической конференции «Энергосистема: Исследование свойств, Управление, Автоматизация», проводившейся Институтом Автоматизации Энергетических Систем в мае 2009, г. Новосибирск; на заседании научно-технического совета В5 РНК СИГРЭ по теме «Автоматика ликвидации асинхронного хода. Алгоритмы, область применения и технические требования к устройствам», проводившемся ОАО «СО ЕЭС» в октябре 2010, г. Москва.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 7 печатных работ; из них 5 – статьи в сборниках научных трудов, 2 – вошедших в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка библиографических источников из 78 наименований и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 181 страницах, содержит 51 рисунок и 13 таблиц.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена их

практическая ценность, приведено краткое изложение содержания работы.

В главе 1 рассмотрены различные виды асинхронных ходов, изложены основные причины их возникновения. Приведен сравнительный анализ алгоритмов выявления АР серийно выпускаемых в России устройств АЛАР и способов выявления асинхронного режима.

Согласно проведенному анализу способов выявления, можно сделать вывод, что вектор сопротивления  $\dot{Z}_p$  достаточно полно отображает состояние системы, и анализ его изменения позволяет надежно выявлять АР. Также данный способ позволяет по измерениям в одной точке, т.е. без создания дополнительного канала связи и дополнительных измерений, эффективно выявлять АР.

Анализ алгоритмов устройств АЛАР показал, что на данный момент разработаны устройства и алгоритмы, позволяющие достаточно эффективно выявлять симметричный асинхронный режим. Однако до настоящего времени вопросы разработки устройств АЛАР для работы в неполнофазном режиме практически не исследованы. Для работы в данном режиме используется простейший токовый алгоритм, не обладающий достаточной эффективностью и селективностью.

Показана целесообразность разработки алгоритмов адаптации АЛАР для работы в неполнофазных режимах.

В главе 2 предложена математическая модель для анализа асинхронных ходов при неполнофазной работе контролируемого участка энергосистемы. Рассмотрены закономерности изменения сопротивления прямой последовательности для распознавания асинхронного хода при различных несимметричных режимах. Выявлены основные изменения, которые происходят с годографом вектора сопротивления прямой последовательности при переходе в неполнофазный режим. Рассмотрены особенности изменения сопротивления прямой последовательности при асинхронном ходе в случае неполнофазного режима на связях с параллельными линиями. Представлены основные факторы, влияющие на величину и положение годографа сопротивления, как в симметричном режиме, так и в неполнофазном режиме.

Исследование несимметричных режимов работы ЭЭС проводится с использованием комплексных схем замещения. При этом в целях получения наиболее общих зависимостей применяется теория четырехполосников. Такой подход значительно упрощает анализ и позволяет легко перейти от четырехполосников к продольным и поперечным сопротивлениям.

Использовать для работы АЛАР в несимметричных режимах полное сопротивление  $\dot{Z}$  какой-либо фазы нецелесообразно, поскольку получаемые зависимости в этих режимах достаточно громоздки, а анализ годографов существенно усложняется.

Поэтому предлагается применить способ выявления АР с использованием сопротивления прямой последовательности  $\dot{Z}_1$  и скорости его изменения  $\frac{d\dot{Z}_1}{dt}$ . Сопротивление прямой последовательности определяется как отношение напряжения  $\dot{U}_1$  и тока  $\dot{I}_1$  прямой последовательности:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{I_1}. \quad (1)$$

Такое решение дает возможность создать универсальный алгоритм, позволяющий эффективно выявлять АР как в симметричных режимах, так и при наличии продольной несимметрии на контролируруемом участке.

Асинхронный режим в условиях несимметрии имеет ряд особенностей по сравнению с симметричными асинхронными ходами. В связи с чем были проанализированы закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в следующих режимах:

- симметричный режим;
- режим работы двумя фазами;
- режим работы одной фазой.

Анализ полученных выражений показал, что при несимметричном АР годограф  $\dot{Z}_1$  может быть представлен семейством окружностей, радиусы и удаленности от начала координат которых зависят:

- от соотношения модулей ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2(k)$ ;
- от вида несимметрии, а именно от величины дополнительного сопротивления несимметричного повреждения  $Z_{\Delta L}^{(n)}$ .

При переходе из симметричного режима в несимметричный происходит искажение годографа вектора сопротивления прямой последовательности (рис.1), при этом изменяется величина (радиус) годографа  $R$  и положение годографа относительно начала координат  $\rho$ , а значит, изменяется и положение ЭЦК (рис.2). В таблице 1 представлены основные закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в различных режимах, а также величины тех изменений, которые происходят с годографами вектора сопротивления при переходе в соответствующий режим.

Таблица 1

Закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в различных режимах

Режим	Параметры			
	$\dot{Z}_1$	$Z_{\Delta L}^{(n)}$	$R$	$\rho$
Симметричный	$-\dot{Z}_{II} + \frac{\dot{Z}_1}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	-	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot Z_1$	$\left( \frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{II}}{Z_1} \right) \cdot Z_1$
Работа двумя фазами	$-\dot{Z}_{II} + \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\Delta L}^{(1)}}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	$\frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_0}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0}$	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)})$	$\left( \frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{II}}{Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)}} \right) \times (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)})$
Работа одной фазой	$-\dot{Z}_{II} + \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\Delta L}^{(2)}}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	$\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0$	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)})$	$\left( \frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{II}}{Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)}} \right) \times (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)})$

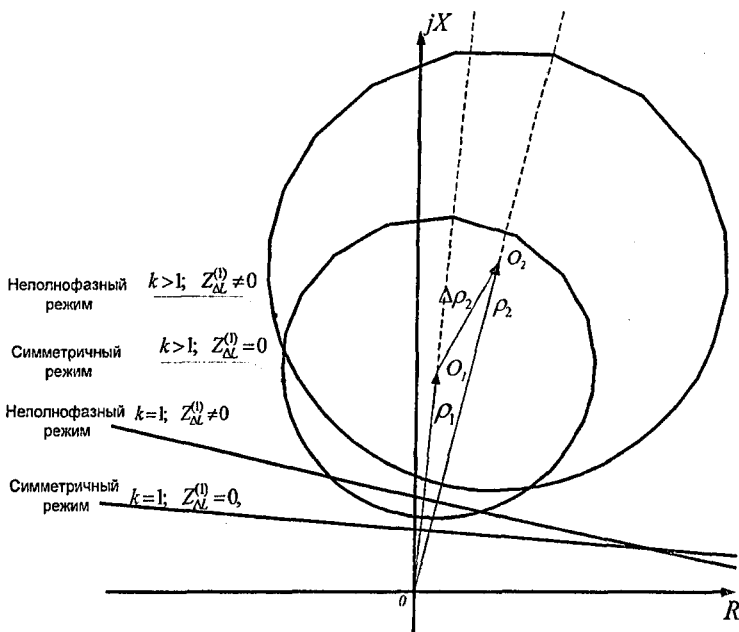


Рис. 1. Годограф  $Z_1 = f(\delta)$  при симметричном и несимметричном АР

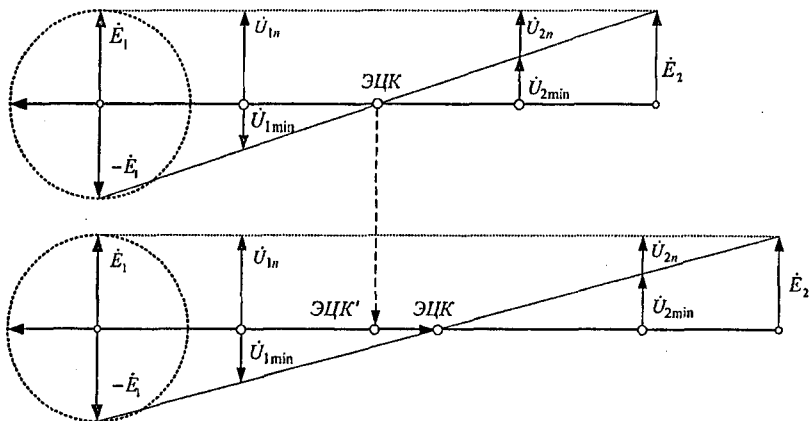


Рис. 2. Смещение ЭЦК

Асинхронный ход в условиях неполнофазного режима одной из параллельных линии имеют ряд особенностей. Произведен анализ закономерности изменения сопротивления прямой последовательности  $Z_1$ , на примере двухма-



шинной системы (рис 3), связанной двумя и более линиями связи в симметричном режиме, а также при условии неполнофазного режима одной из линий.

Переход в неполнофазный режим характеризуется для схемы прямой последовательности «электрическим удлинением» линии. Иными словами, сопротивление линии увеличится на величину сопротивления несимметричного повреждения  $Z_{\Delta L}^{(n)}$ . Анализ изменения сопротивления прямой последовательности в общем случае достаточно затруднителен (необходимо учесть промежуточные отборы мощности, неоднородность и т.д.). Поэтому для качественной оценки тех изменений, которые наблюдаются при переходе в неполнофазный режим, достаточно рассмотреть закономерности при условии, что схемы замещения линий представлены одним комплексным сопротивлением (без промежуточных отборов мощности).

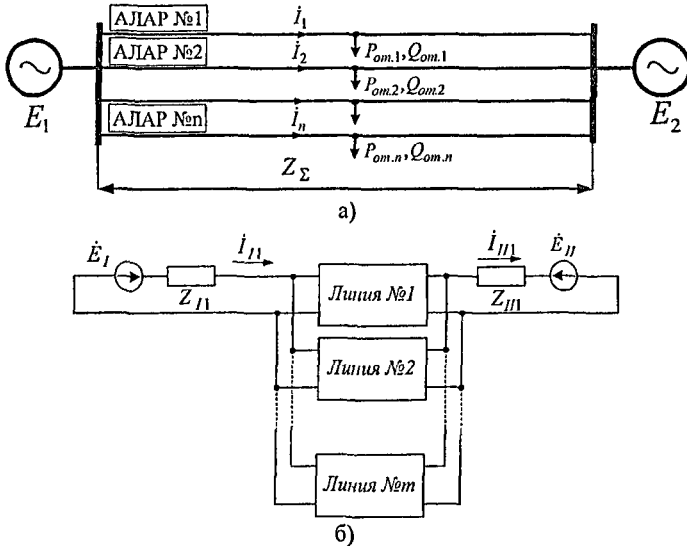


Рис. 3. Расчетная схема (а) и схема замещения (б)

Согласно принятым допущениям, А-параметры  $i$ -й линии:

$$A_i = 1; B_i = \dot{Z}_i; C_i = 0; D_i = 1.$$

У-параметры  $i$ -й линии:

$$\dot{Y}_{11i} = \dot{Y}_{22i} = \frac{1}{\dot{Z}_i}; \dot{Y}_{12i} = \dot{Y}_{21i} = -\frac{1}{\dot{Z}_i}.$$

Пусть  $\dot{Y}_{11i} = \dot{Y}_{22i} = \dot{Y}_i$ , тогда  $\dot{Y}_{12i} = \dot{Y}_{21i} = -\dot{Y}_i$ . У-параметры эквивалентного четырехполюсника равны:

$$\dot{Y}_{11\Sigma} = \dot{Y}_{22\Sigma} = \sum_{i=1}^n \dot{Y}_i; \dot{Y}_{12\Sigma} = \dot{Y}_{21\Sigma} = -\sum_{i=1}^n \dot{Y}_i.$$

Измеряемое сопротивление  $i$ -го комплекта АЛАР можно найти по выражению

$$\dot{z}_i = k_{Ti} \left( \frac{\dot{E}_I}{I_i} - \dot{z}_i \right), \quad (2)$$

где  $k_{Ti}$  – комплексный коэффициент токораспределения.

Показано, что коэффициенты токораспределения для неповрежденных линий будут существенно отличаться от коэффициента токораспределения линии, работающей в неполнофазном режиме. Пусть  $k$ -я линия работает в неполнофазном режиме, тогда ее параметры будут равны:

$$\dot{Y}_{11k} = \dot{Y}_{22k} = \frac{1}{\dot{z}_k + Z_{\Delta L}^{(n)}}, \dot{Y}_{12k} = \dot{Y}_{21k} = -\frac{1}{\dot{z}_k + Z_{\Delta L}^{(n)}}.$$

Согласно принятым ранее обозначениям:

$$\dot{Y}_k = \frac{1}{\dot{z}_k + Z_{\Delta L}^{(n)}}.$$

Тогда коэффициент токораспределения для неповрежденной линии  $\dot{k}_{Ti(n)}$  будет равен:

$$\dot{k}_{Ti(n)} = k_{Ti} - \frac{\dot{z}_i \dot{z}_{\Delta L}^{(n)}}{\dot{z}_k (\dot{z}_k + \dot{z}_{\Delta L}^{(n)})}. \quad (3)$$

Коэффициент токораспределения  $\dot{k}_{Tk(n)}$  для поврежденной линии будет равен:

$$\dot{k}_{Tk(n)} = k_{Tk} + \dot{z}_{\Delta L}^{(n)} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq k}}^n \frac{1}{\dot{z}_j}. \quad (4)$$

Система выражений для сопротивления прямой последовательности в условиях неполнофазного режима на параллельных линиях будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_{II} = k_{Ti(n)} \left( \frac{\dot{z}_{\Sigma}}{1 - \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}} - \dot{z}_{II} \right) \\ \dot{z}_{Ik} = k_{Tk(n)} \left( \frac{\dot{z}_{\Sigma}}{1 - \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I}} - \dot{z}_{II} \right) \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\dot{k}_{Ti(n)}$  – коэффициент токораспределения для неповрежденной линии,  $\dot{k}_{Tk(n)}$  – коэффициент токораспределения для поврежденной линии,  $\dot{z}_{\Sigma}$  – сопротивление линии связи между системами.

Показано, что при переходе в неполнофазный режим годограф вектора сопротивления неповрежденной линии будет расположен в области между годографами, построенными для данной линии в полной схеме и для неполной схемы при отключении поврежденной линии, при условии, что фазы эквивалентного сопротивления прямой последовательности  $\dot{z}_{\Sigma}$  и сопротивления несимметричного повреждения  $Z_{\Delta L}^{(n)}$  равны между собой.

В главе 3 рассмотрены закономерности изменения сопротивления прямой последовательности  $Z_{1n}$  в сложной многомашиной системе при неполнофазной работе одной линии. В качестве схемы для детального анализа закономерностей изменения сопротивления прямой последовательности в местах установки устройств АЛАР была выбрана объединенная Таймырская и Норильская энергосистема. Структурная схема сети 220 кВ, где наиболее вероятно возникновение неполнофазных асинхронных ходов представлена на рис. 4.

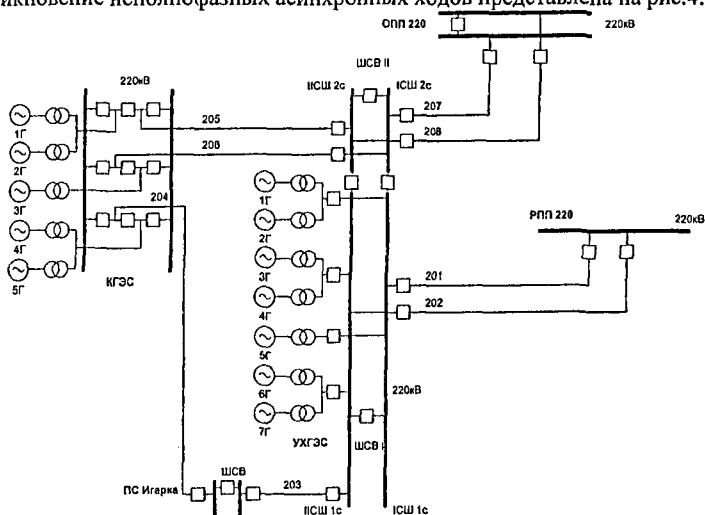
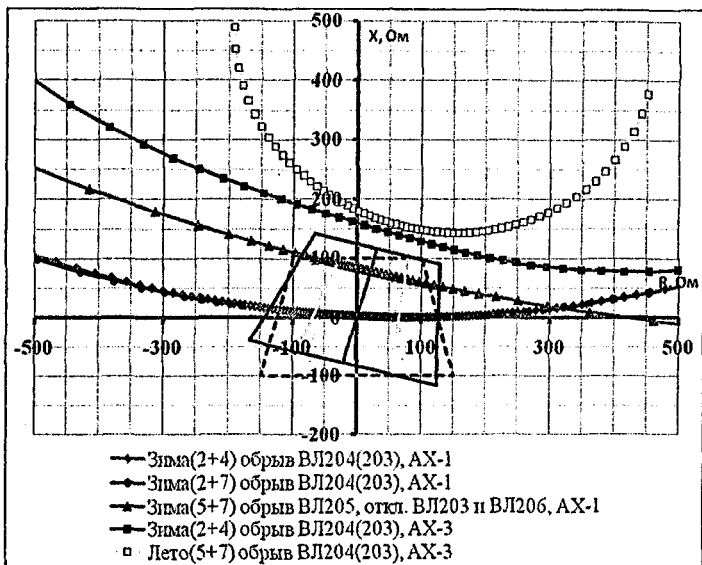


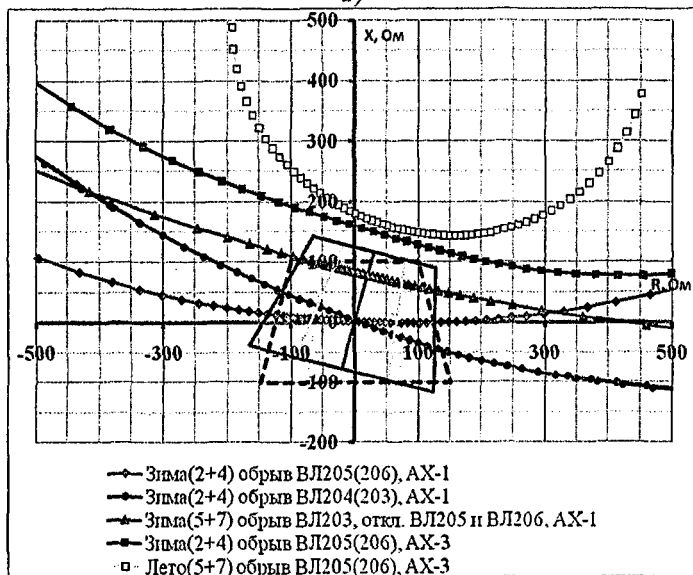
Рис. 4. Структурная схема сети 220 кВ объединенной Таймырской и Норильской энергосистемы

Получены годографы сопротивления прямой последовательности для различных состояний схемы (нормальная, ремонтная) и режимов (зимний, летний) в полностью симметричном режиме, а также при условии неполнофазного режима на одной из линий. Рассчитаны две группы уставок для комплектов АЛАР линий 204, 205 и 206 (со стороны Курейской ГЭС) – основная группа уставок и группа уставок несимметричного режима (рис. 5). Расчеты режимов выполнялись с применением комплекса *MUSTANG*, расчеты сопротивлений несимметричного повреждения были выполнены в пакете *ARM-ТКЗ*. Для этого были составлены расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, рассчитаны дополнительные сопротивления несимметричного повреждения на контролируемом участке для нормальных и ремонтных схем в условиях различного состава оборудования на ТЭЦ и ГЭС энергосистемы.

Несимметричные режимы моделировались в пакете *MUSTANG* по принципу эквивалентности прямой последовательности, то есть в месте повреждения последовательно включалось добавочное сопротивление несимметричного повреждения.



а)



б)

Рис. 5. Настройка АЛАР ВЛ 205(206) (а) и ВЛ 204(203) (б) со стороны КГЭС. Группа уставок несимметричного режима

На основании полученных закономерностей показаны основные особенности расчета неполнофазных асинхронных ходов. По результатам расчетов предложено три подхода к реализации универсального алгоритма АЛАР. Объем и сложность расчетов неполнофазных асинхронных ходов существенно превосходит объем расчетов для симметричных асинхронных ходов, однако выявленные при расчетах особенности позволяют создать универсальный алгоритм АЛАР.

Глава 4 посвящена разработке алгоритмов и принципов АЛАР для работы в условиях неполнофазного режима. Разработана методика определения комплексных значений токов и напряжений на основании замеряемых мгновенных значений входных величин, позволяющая реализовать корректное определение комплексных значений входных сигналов при отклонениях частоты, достигающих  $\pm 10$  Гц. Разработаны алгоритмы выделения параметров прямой и обратной последовательности на базе цифровых фильтров.

Предложен критерий выбора оптимальной характеристики срабатывания органа выявления асинхронного режима (ОВАР), основанный на получении максимально возможного скольжения отката. Показано, что для построения ОВАР целесообразно использовать характеристики в комплексной плоскости в виде равнобедренной трапеции, произвольным образом смещенной относительно осей R и X. Предложены алгоритмы выявления АР и отстройки от синхронных качаний и КЗ на базе методов "Теории распознавания образов". Произведен анализ возможности адаптации к неполнофазному режиму и предложен алгоритм, обеспечивающий изменение группы уставок при появлении признаков несимметрии.

Частотно-независимый алгоритм определения комплексных значений токов и напряжений на основании замеряемых мгновенных значений основывается на алгоритме двух выборок и реализован с помощью двух фазовращателей, разность фазочастотных характеристик (ФЧХ) которых не зависит от частоты. В этом случае принимаемые одновременно выборки будут сдвинуты на заданный фиксированный угол. При этом необходимо, чтобы фазовращатели удовлетворяли требованию постоянства амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в этом же диапазоне частот. Для этого использовались всепропускающие фильтры (all-pass filter), разность ФЧХ которых не зависит от частоты, и в заданном диапазоне частот равна некоторой постоянной величине. Такие фазовые соотношения выполнимы только для первой гармонической составляющей. Для устранения небаланса, возникающего при наличии высших гармоник или аperiodической составляющей, применены полосовые фильтры (ПФ). Структурная схема алгоритма цифровой обработки сигналов для определения ортогональных составляющих представлена на рис. 6. Цифровые фильтры должны иметь характеристики АЧХ и ФЧХ, показанные на рис. 7.

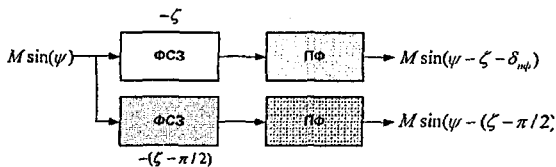


Рис. 6. Алгоритм цифровой обработки сигналов

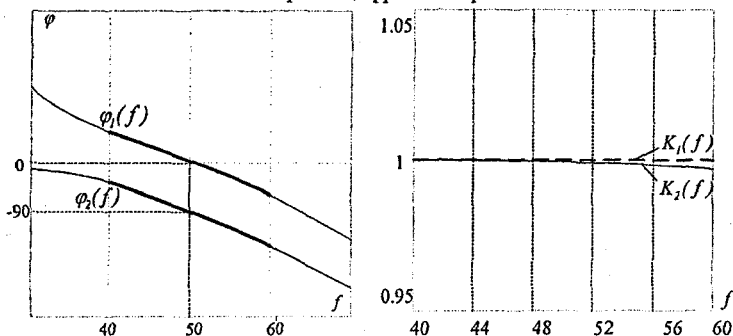


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ фазовращателей

Для корректной работы АЛАР в условиях несимметрии требуется определение параметров прямой и обратной последовательности (тока и напряжения) на основе замеров мгновенных значений токов и напряжений трех фаз. Данная задача решена методами цифровой фильтрации.

Используя известные соотношения метода симметричных составляющих, можно получить следующие выражения:

$$\dot{U}_{1A} = \frac{1}{3} \cdot \left( \dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} \cdot e^{j\frac{\pi}{3}} \right), \quad (6)$$

$$\dot{U}_{2A} = \frac{1}{3} \cdot \left( \dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} \cdot e^{-j\frac{\pi}{3}} \right). \quad (7)$$

На основе выражений (6) и (7) реализован цифровой фильтр прямой и обратной последовательности, схема которого представлена на рис. 8.

Опыт эксплуатации устройств АЛАР показывает, что типовые устройства во многих случаях не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Прежде всего это связано с тем, что характеристики срабатывания измерительных органов типовых панелей и некоторых современных микропроцессорных устройств имеют вид, наиболее подходящий для построения дистанционных защит, а не для выполнения соответствующих функций в составе выживительного

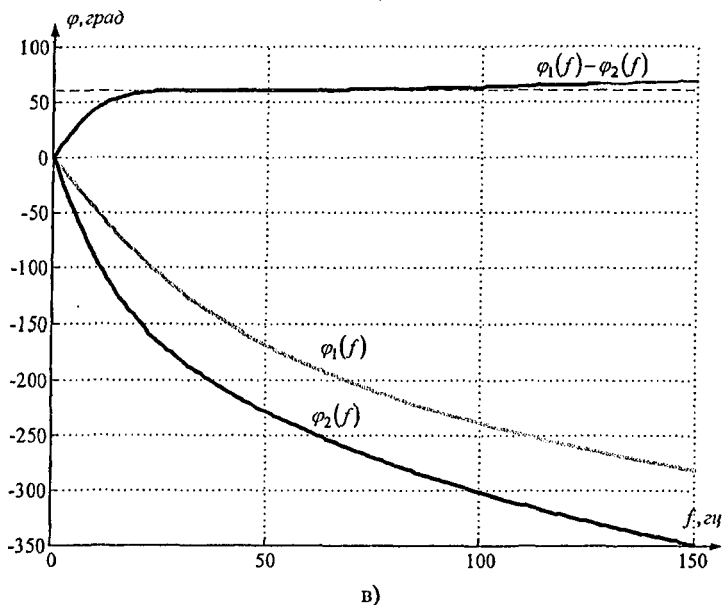
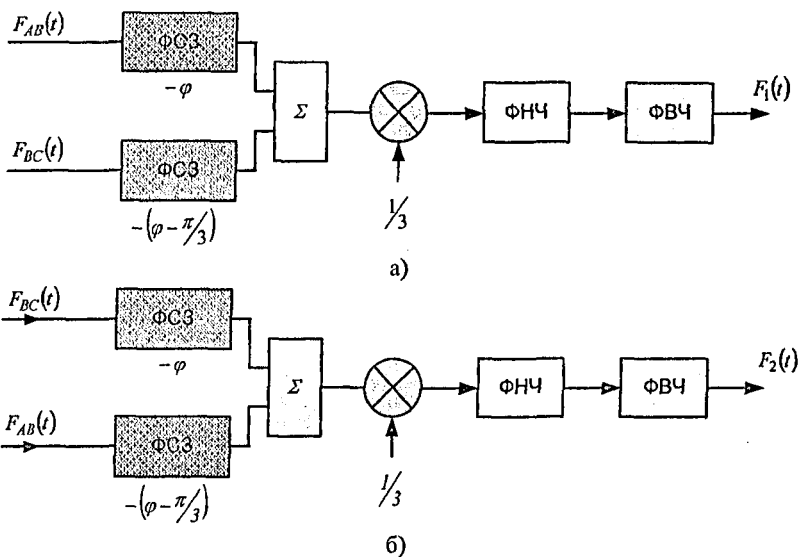


Рис. 8. Структура цифрового фильтра прямой(а) и обратной(б) последовательности. ФЧХ пары фазовращателей, осуществляющих сдвиг на  $60^\circ$ (в).

органа асинхронных режимов. В связи с чем предложен критерий выбора оптимальной характеристики срабатывания ОБАР для выявления АР, основанный на получении максимально возможного скольжения отката и удовлетворяющий требованиям эффективности выявления АР в контролируемом сечении:

$$K_{\text{опт}} = \max (s_{\text{отк}})$$

Предложено для обеспечения селективной и надежной работы первой ступени АЛАР, а также для корректной работы счетчика циклов, используемого для реализации второй и третьей ступеней АЛАР, характеристику органа направления мощности жестко связать с характеристиками срабатывания дистанционных органов. Целесообразно, чтобы характеристика срабатывания органа направления мощности совпадала с высотой трапеций, проходящей через середины их оснований.

Далее изложена методика выявления АР, отстройки от коротких замыканий (КЗ) и синхронных качаний (СК), основанная на методах теории распознавания образов.

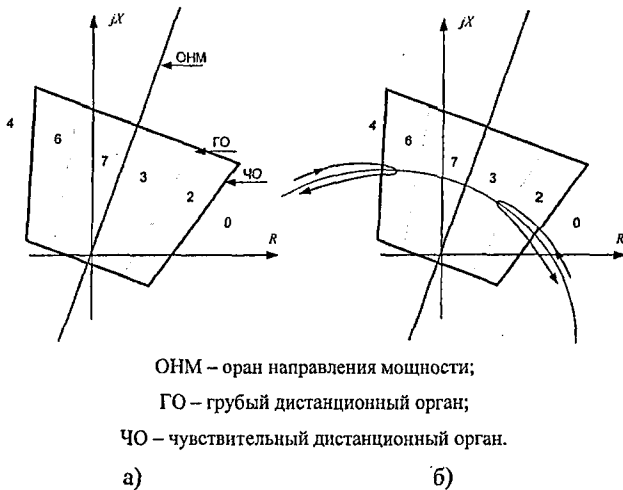
*Выявление асинхронного режима* осуществляется путем анализа очередности прохождения вектора  $\dot{Z}_p$  через области в комплексной плоскости, на которые ее разделяют границы зон действия измерительных органов. На рис. 9а показаны эти области.

Приведенные на рисунке номера областей соответствуют кодам, составленным из дискретных сигналов, каждый из которых характеризует состояние соответствующего органа. Нормальному режиму работы электрической системы соответствует положение вектора  $\dot{Z}_p$  в областях "0" или "4" в зависимости от направления передаваемой активной мощности по контролируемой связи. При нахождении  $\dot{Z}_p$  в области "0" и возникновении АР этот вектор перемещается по траектории, которая сначала попадает в область "2" (срабатывает ЧО), затем переходит в область "3" (срабатывает ГО), а затем попадает в область "7" (срабатывает ОНМ). Такое развитие событий соответствует срабатыванию АЛАР на первом цикле. При этом очередность прохождения областей комплексной плоскости соответствует ускорению системы, находящейся "за спиной" АЛАР.

При нахождении  $\dot{Z}_p$  в области "4" и возникновении АР этот вектор начинает перемещаться по траектории, которая сначала попадает в область "6" (срабатывает ЧО), затем переходит в область "7" (срабатывает ГО), а затем попадает в область "3" (возврат ОНМ). Это соответствует срабатыванию АЛАР на первом цикле, но при этом очередность прохождения областей комплексной плоскости соответствует торможению системы, находящейся "за спиной".

Если АР продолжается более одного цикла, то при каждом переходе  $\dot{Z}_p$  через характеристику срабатывания ОНМ вне зоны действия ЧО фиксируется завершение очередного полного цикла АР. По превышению заданного числа циклов формируется выходной сигнал "Срабатывание 2-ой ступени".





ОНМ – оран направления мощности;

ГО – грубый дистанционный орган;

ЧО – чувствительный дистанционный орган.

а)

б)

Рис. 9. Характеристика срабатывания ОВАР в комплексной области сопротивлений (а), очередность прохождения зон при синхронных качаниях (б).

*Отстройка от СК.* При неглубоких качаниях  $\dot{Z}_p$  либо перемещается в одной из областей "0" или "4" (рис. 9б), либо осуществляет периодические переходы между этими областями вне зоны действия ЧО. В этом случае режим синхронных качаний выявляется по превышению максимально возможной длительности цикла АР. При глубоких качаниях вектор  $\dot{Z}_p$  может заходить из области "0" в область "2", а затем снова возвращаться в область "0". В этом случае возможно также попадание вектора в область "3" с последующим возвратом в "2" и далее в "0". Возможны заходы вектора  $\dot{Z}_p$  из области "4" в область "6" с последующим возвратом в область "4". При более глубоких качаниях возможно попадание вектора в область "7" с последующим возвратом в "6" и далее в "4". Во всех случаях возникновения синхронных качаний они надежно выявляются или по длительности нахождения вектора  $\dot{Z}_p$  в одной области, или по очередности нахождения его в различных областях. При выявлении любого из признаков синхронных качаний счетчик циклов возвращается в исходное состояние.

*Отстройка от КЗ.* При симметричных коротких замыканиях вектор  $\dot{Z}_p$  скачком попадает в зону действия ГО. Поскольку при этом необходимая последовательность прохождения областей "0"- "2"- "3"- "7" или "4"- "6"- "7"- "3" не выполняется, действия АЛАР не происходит. При несимметричных коротких замыканиях, сопровождающихся появлением токов и напряжений обратной последовательности, работа АЛАР (для симметричных режимов) блокируется, а все ее элементы переводятся в исходное положение. Для АЛАР, работающем на принципе измерения сопротивления прямой последовательности, появление

признаков несимметрии приводит к запуску алгоритма адаптации. При этом действие алгоритма АЛАР будет проходить так же, как и при симметричных КЗ.

Произведен анализ возможности адаптации АЛАР к неполнофазному режиму и предложен алгоритм, осуществляющий изменение группы уставок при выявлении признаков несимметрии. В основе алгоритма лежит выявление момента перехода из одного режима в другой (из симметричного в несимметричный). Основными признаками несимметричного режима является появление параметров обратной и нулевой последовательности. Реализован пусковой орган, реагирующий на появление тока  $i_2$  или напряжения  $U_2$  обратной последовательности. Для избежания ложной работы предусмотрен дополнительный алгоритм блокировки при обрывах в измерительных цепях (токов и напряжений). Блок-схема алгоритма представлена на рис.10.

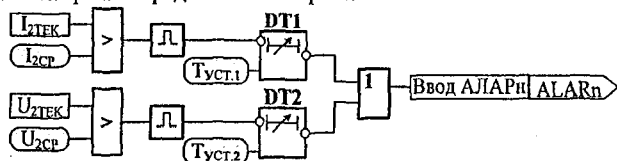


Рис. 10. Блок-схема алгоритма адаптации к неполнофазному режиму.

В главе 5 изложены результаты испытаний разработанных алгоритмов АЛАР для неполнофазных режимов на электродинамической модели.

Для проверки работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов осуществлена их реализация в виде программ, работа которых проверялась на технических средствах локальной противоаварийной автоматики, разработанных ЗАО "ИАЭС".

Испытания алгоритмов автоматики ликвидации асинхронных режимов и ее адаптации к неполнофазным режимам производились на электродинамической модели (ЭДМ) кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. На предварительном этапе проверка осуществлялась с использованием испытательного устройства РЕТОМ-51. Для испытаний алгоритмов АЛАР на ЭДМ рассматривались две схемы, моделирующие электроэнергетическую систему. В качестве первой схемы была принята простейшая система генератор – трансформатор – одноцепная линия – шины бесконечной мощности; в качестве второй схемы была принята трехмашинная электроэнергетическая система, по своей топологии приближенная к энергосистеме Норильского энергетического комплекса.

В ходе испытаний осуществлялась проверка:

- срабатывания АЛАР при асинхронном ходе в неполнофазном режиме с ЭЦК на контролируемом участке;
- срабатывания АЛАР при асинхронном ходе с ЭЦК на контролируемом участке и при неполнофазном режиме на параллельной линии;
- срабатывания АЛАР при ЭЦК в месте установки устройства;

- несрабатывания АЛАР при асинхронном ходе с ЭЦК на смежном участке и неполнофазном режиме на контролируемом участке;
- несрабатывания АЛАР в режиме синхронных качаний при неполнофазном режиме одной из линий;
- несрабатывания АЛАР при несимметричных КЗ.

В несимметричном режиме также проводились испытания, целью которых была проверка действия алгоритма, осуществляющего смену группы уставок при переходе из симметричного режима в неполнофазный и обратно.

В результате испытаний установлено, что система корректно работает как в симметричных режимах, так и при неполнофазном режиме одной из линий. Правильно работают первая и вторая ступени АЛАР при асинхронном режиме и обеспечена надежная отстройка от КЗ и синхронных качаний.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Предложено использовать в алгоритме АЛАР принцип контроля сопротивления прямой последовательности и скорости его изменения для выявления асинхронного хода в условиях несимметрии.

2. Выявлены закономерности изменения сопротивления прямой последовательности и его годографа для распознавания асинхронного хода при различных несимметричных режимах для простых связей и связей с параллельными линиями

3. Получены закономерности изменения сопротивления прямой последовательности при неполнофазной работе одной из линий в сложной многомашиной системе (на примере объединенной энергосистемы, включающей в себя каскад Таймырских ГЭС и Норильский энергетический комплекс).

4. Разработан алгоритм определения комплексных значений токов и напряжений по мгновенным значениям входных параметров при изменении частоты в большом диапазоне. Разработаны алгоритмы выделения параметров прямой и обратной последовательностей средствами цифровой фильтрации, корректно работающие при отклонениях частоты от номинальной на  $\pm 10$  Гц.

5. Предложен критерий выбора оптимальной характеристики срабатывания органа выявления асинхронного режима (ОВАР) для распознавания АР, основанный на получении максимально возможного скольжения отказа.

6. Разработан алгоритм выявления асинхронного режима, отстройки от синхронных качаний и коротких замыканий, основанный распознавании образов.

7. Произведен анализ возможности адаптации АЛАР к неполнофазному режиму и предложен алгоритм, изменяющий группы уставок при выявлении признаков несимметрии.

8. Разработанные принципы и алгоритмы адаптации устройства АЛАР к неполнофазным режимам реализованы на базе функционального блока шкафа локальной противоаварийной автоматики КПА-М. Проведена экспериментальная проверка разработанных алгоритмов АЛАР на электродинамической модели. В результате испытаний установлено, что система корректно работает как в симметричных режимах, так и при неполнофазном режиме одной из линий.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Танфильев, О. В. Разработка адаптивных алгоритмов автоматки ликвидации асинхронного режима для неполнофазных режимов [Текст] / О. В. Танфильев, В. Е. Глазырин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 202-207.
2. Танфильев, О. В. Разработка частотно-независимого алгоритма распределения комплексных значений входных величин [Текст] / О. В. Танфильев, В. Е. Глазырин, Г. Э. Торопов // Электро. – 2010. – №1. – С. 23-26.
3. Танфильев, О. В. О способе выявления асинхронного хода в неполнофазных режимах [Текст] / О. В. Танфильев // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы Всероссийской научно-технической конференции – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 94-96.
4. Танфильев, О. В. Выявление асинхронного хода в неполнофазных режимах [Текст] / О. В. Танфильев // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Ч.3. – С. 191-192.
5. Танфильев, О. В. Выбор оптимальной характеристики органа выявления асинхронного хода [Текст] / О. В. Танфильев // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – Ч.3. – С. 169-170.
6. Танфильев, О. В. Разработка алгоритмов АЛАР для работы в неполнофазных режимах [Текст] / О. В. Танфильев, В. Е. Глазырин // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы пятнадцатой Всероссийской научно-технической конференции – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 43-45.
7. Танфильев, О. В. Выявление асинхронного режима на основе методов теории распознавания образов [Текст] / О. В. Танфильев, В. Е. Глазырин // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3т. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – Т.1. – С. 120-121.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного  
Технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс: (383) 346-08-57  
формат 60×84 1/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 1702 подписано в печать 16.11.10 г.