

**Сборник научных статей**

# **Цифровая электротехника: проблемы и достижения**

**Выпуск I**

г. Чебоксары, 2012

Научно-производственное предприятие «ЭКРА»

# **Цифровая электротехника: проблемы и достижения**

Сборник научных статей  
Выпуск I

Чебоксары, 2012

УДК 621.31

ББК 31.2

Ц75

**Редакционная коллегия:**

**Ю.Н. Алимов**, канд. техн. наук (главный редактор),

**Н.А. Дони**, канд. техн. наук (научный редактор),

**А.М. Наумов**, канд. техн. наук,

**А.А. Шурупов**, канд. техн. наук,

**В.М. Шевцов**, канд. техн. наук (ответственный редактор).

**Ц75 Цифровая электротехника: проблемы и достижения:**  
Сборник научных статей. Выпуск I. – Чебоксары: РИЦ  
«СРЗАУ», 2012. – 120 с.

Сборник содержит научно-технические статьи, в которых обсуждаются результаты актуальных исследований в области цифровой электротехники и электроэнергетики: микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, комплектных устройств оперативного тока, систем управления электроприводами и др.

Для инженеров, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов электротехнических и энергетических специальностей вузов, а также инженерно-технического персонала различных энергопредприятий.

*Печатается по решению научно-технического совета НПП «ЭКРА»*

УДК 621.31

© ООО НПП «ЭКРА», 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Малый А.П., Шурупов А.А.</b> Использование годографа мощности для выявления асинхронного режима.....	07
<b>2. Кошельков И.А., Дони Н.А., Петров А.А.</b> Метод измерения частоты для устройства АПВ с улавливанием синхронизма.....	14
<b>3. Антонов В.И., Наумов В.А, Шевцов В.М.</b> Оценка частоты электрической сети: теоретические основы и практические алгоритмы.....	20
<b>4. Кошельков И.А., Дони Н.А., Петров А.А.</b> Особенности автоматического повторного включения с контролем синхронизма.....	39
<b>5. Доронин А.В., Лебедев А.В., Воробьев И.А.</b> Реализация защиты ротора от замыкания на землю при работе генератора с несколькими системами возбуждения.....	54
<b>6. Гуцин Г.Д., Несмеянов Д.А., Шевцов В.М.</b> Вариант надёжной защиты шин КРУ СН-6 кВ Чебоксарской ГЭС.....	59
<b>7. Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И.</b> Контроль изоляции в цепях оперативного постоянного тока.....	70
<b>8. Вишневский В.И.</b> Адаптивный нечёткий скользящий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя.....	88
<b>9. Сергеев А.В.</b> Методы XML-сериализации.....	109

*Посвящается 20-летию НПП «ЭКРА»*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Цифровая электротехника – это новейшее научно-техническое направление в современной электротехнике, объединяющее различные цифровые устройства, приборы и системы. Основным отличительным признаком объектов цифровой электротехники является наличие встроенного микропроцессора, обеспечивающего цифровую обработку входных сигналов, формирование алгоритмов функционирования устройств и систем, а также выдачу необходимых выходных сигналов-управляющих воздействий. Благодаря современным достижениям в области микроэлектронной элементной базы и созданию более совершенных программных средств «цифровая среда» обеспечивает высокую точность и скорость выполняемых операций, возможность регистрации и хранения больших объёмов, как поступающей информации, так и результатов цифровой обработки потоков данных.

К элементам цифровой электротехники относятся и микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики, различные цифровые системы управления электроприводами, системы векторных измерений, цифровые аварийные осциллографы, встроенные в ячейки низковольтных комплектных устройств микропроцессорные терминалы систем управления и контроля изоляции, АСУ ТП, АСКУЭ и др. Эти автоматические устройства и системы, благодаря достаточно точному выполнению алгоритмов функционирования, наличию памяти, гибкой адаптации к изменяющимся внешним условиям, моделированию и про-

гнозированию состояния наблюдаемых технических объектов, приобретают свойства «искусственного интеллекта» и могут быть названы «умными системами».

Благодаря широкому внедрению этого класса цифровых устройств электротехники на вновь строящихся и реконструируемых объектах электроэнергетики России и за рубежом появились такие новые мировые направления развития электросетевого комплекса как SMART GRID, «цифровые подстанции», «умные сети». Целый ряд производственных отделов научно-производственного предприятия «ЭКРА» активно участвует в разработках российских проектов в этой области.

Научно-технические статьи, которые включены в данный сборник, подготовлены сотрудниками НПП «ЭКРА» и освещают некоторые теоретические и практические результаты, полученные в ходе исследований и разработок новых цифровых устройств электротехники.

В дальнейшем планируется продолжить издание новых материалов по проблемам цифровой электротехники в следующем выпуске сборника научно-технических статей сотрудников предприятия.

Редколлегия.

УДК 621.311.1:621.316.925

А.П. Малый, А.А. Шурупов.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОДОГРАФА МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

**Аннотация:** построение годографа асинхронного режима в плоскости (P,Q).

**Ключевые слова:** асинхронный режим, годограф.

Измерительные органы (ИО) автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР) предназначены для выявления асинхронного режима (АР) в энергосистеме. Их характеристики должны обеспечивать селективность и чувствительность АЛАР.

Наиболее часто для расчёта уставок и анализа поведения ИО АЛАР при АР используется представление характеристик реле сопротивления и годографа АР в комплексной плоскости сопротивлений (R,X). Для устройств АЛАР, в которых для счёта циклов используются реле мощности, представляет интерес также годограф АР в комплексной плоскости мощности (P, Q) [1].

В литературе часто приводятся реально снятые в энергосистемах и на моделях годографы мощности АР в плоскости (P, Q) [2], но разработчикам устройств АЛАР и обслуживающему персоналу для выбора уставок и анализа поведения АЛАР требуется возможность заранее для конкретного места установки устройства рассчитать положение годографа АР в этой плоскости.

В то время, как в плоскости (R,X) при изменении места установки устройства АЛАР годограф АР просто меняет своё положение относительно характеристик ИО, в плоскости (P, Q) он, как показано ниже, трансформируется (меняет форму).

Расчёт годографа проведём при следующих допущениях, приемлемых для устройств выявления АР:

- схема сети приведена к схеме генератор – сопротивление системы – шины бесконечной мощности (схема G-B) – рис. 1,а, – которую для удобства расчётов представим в виде рис. 1,б, где шины в середине системы обозначают электрический центр системы, делящий сопротивление системы пополам ( $X=X_{СИСТ}/2$ );

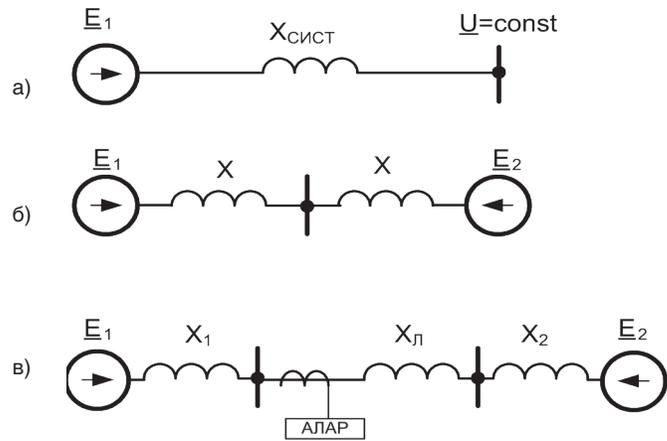


Рис.1. Упрощенная расчётная схема системы

- сопротивление элементов системы чисто индуктивное ( $X$ );
- э.д.с. генератора и системы равны по модулю ( $E_1=E_2$ ,  $m=E_1/E_2=1$ );
- знак скольжения  $s$  положительный ( $E_1$  опережает и вращается быстрее  $E_2$ ).

Для расчёта уставок ИО АЛАР линии  $X_{л}$ , рис. 1,в, производят «свёртывание» сопротивления частей системы «за спиной» ( $X_1$ ) у места установки устройства и за шинами противоположной подстанции ( $X_2$ ). В частных случаях расположения устройства АЛАР соотношения между  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_{л}$  может быть любым, то есть устройство АЛАР может располагаться ближе к началу системы, к электрическому центру системы или в какой-то иной точке системы.

Рассмотрим три случая (места) установки устройства АЛАР: в произвольной точке между  $E_1$  и серединой системы; в начале системы, то есть в месте установки э.д.с.  $E_1$ ; в электрическом центре системы.

### 1. Годограф AP в случае расположения АЛАР в промежуточной точке системы

В рассматриваемом (общем) случае АЛАР установлен на расстоянии  $kX$ , от средней точки системы в сторону э.д.с.  $E_1$  (рис. 2 а), где  $k$  меньше или равно единице.

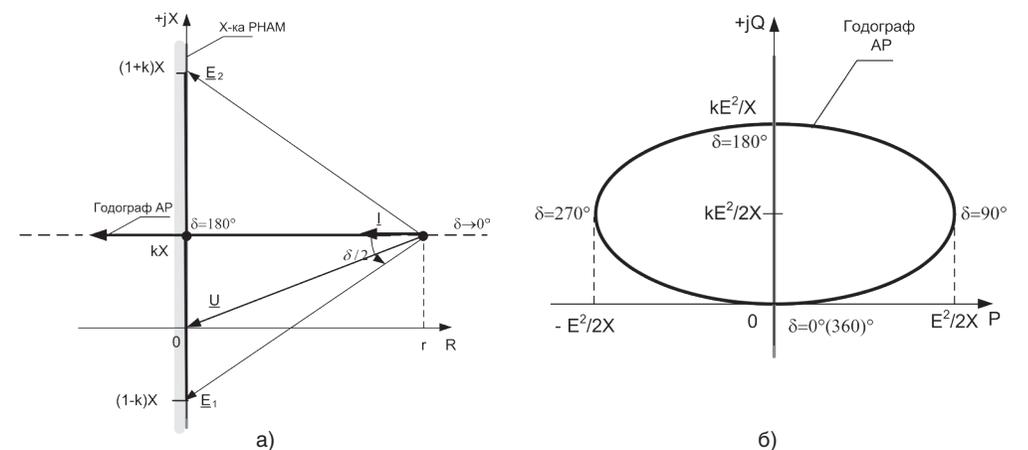


Рис. 2. Годограф AP а) в плоскости (X,Y) и б) - в плоскости (P,Q). Место установки АЛАР – промежуточная точка системы

При принятых допущениях годограф AP в плоскости (R,X) – это прямая, проходящая параллельно оси «X» и смещённая относительно неё на  $kX$ . В точке годографа с текущей абсциссой «r» на плоскости в определённом масштабе показаны вектора  $E_1$  и  $E_2$ , угол между ними  $\delta$ , напряжение  $U$  в месте установки АЛАР и вектор тока  $I$ .

При избыточной мощности со стороны  $E_1$  и положительном скольжении «s» в процессе AP координата «r» смещается влево, угол  $\delta$  возрастает и в точке перехода через ось «jX» становится равным  $180^\circ$ . Ось «jX» совпадает на этой плоскости с характеристикой реле направления активной мощности (РНАМ).

За параметр при расчёте годографа целесообразно принять угол  $\delta$  между векторами  $E_1$  и  $E_2$ . При этом: напряжение в произвольной точке годографа (рис. 2 а)

$$\underline{U} = -E \cos(\delta/2) - jkE \sin(\delta/2),$$

сопротивление в произвольной точке годографа

$$\underline{Z} = X \operatorname{ctg}(\delta/2) + jkX = X(\cos(\delta/2) + jk\sin(\delta/2)) / \sin(\delta/2)$$

ТОК ПО ЛИНИИ

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z} = -E(\cos(\delta/2) + jk\sin(\delta/2)) \sin(\delta/2) / (X(\cos(\delta/2) + jk\sin(\delta/2))) = -E \sin(\delta/2) / X,$$

то есть, ток по линии не зависит от места измерения (места установки АЛАР), полная мощность

$$\underline{S} = (\underline{UI}) = E^2 \sin(\delta/2)(\cos(\delta/2) + jk\sin(\delta/2)) / X, \quad (= \underline{U}^2 / \underline{Z}),$$

активная мощность

$$P = E^2 \sin(\delta/2) \cos(\delta/2) / X = E^2 \sin \delta / 2X,$$

реактивная мощность

$$Q = E^2 k \sin^2(\delta/2) / X = kE^2 (1 - \cos \delta) / 2X.$$

При установке АЛАР в промежуточной точке системы годограф АР отображается в плоскости (P,Q) эллипсом с большой осью, равной  $E^2/X$ , малой осью, равной  $kE^2/X$  и центром в точке  $(0 + jkE^2/2X)$  – рис. 2 б.

Отрезок  $(0, 2X)$  на оси «jX», изображающий в плоскости (R,X) сопротивление системы, отображается при этом в плоскости (P,Q) в отрезок  $(0, kE^2/X)$ , также лежащий на оси «jX» (при угле  $\delta$ , равном  $180^\circ$ ):

$$\underline{S} = \underline{I}^2 \underline{Z} = (-E \sin(\delta/2) / X)^2 * jkX = jkE^2 / X.$$

2. Годограф АР при расположении АЛАР в электрическом центре системы (частный случай,  $k=0$ )

Годограф АР в плоскости (R,X) в этом частном случае – это прямая проходящая по оси «X» (рисунок 3 а):

При  $k=0$  полная мощность

$$\underline{S} = (\underline{UI}) = E^2 \sin(\delta/2) \cos(\delta/2) / X,$$

активная мощность

$$P = E^2 (\sin(\delta/2) \cos(\delta/2)) / X = E^2 \sin \delta / 2X,$$

реактивная мощность

$$Q = 0.$$

Таким образом, при установке АЛАР в центре системы годограф АР отображается в плоскости (P,Q) отрезком  $(-E^2/2X, E^2/2X)$  на оси P.

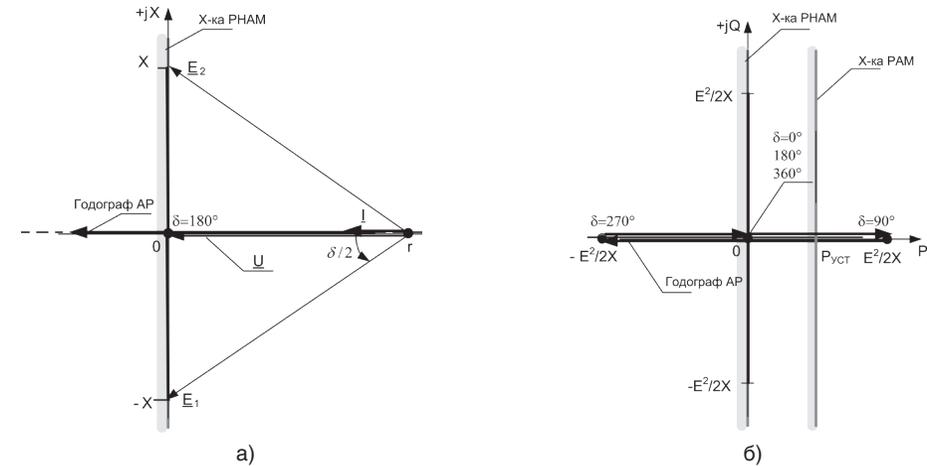


Рис. 3. Годограф АР а) в плоскости (X,Y) и б) - в плоскости (P, Q). Место установки АЛАР – электрический центр системы

На рис. 3 б на этом годографе показаны точки, соответствующие отдельным значениям угла  $\delta$ .

Отрезок  $(-X, X)$  на оси «jX», изображающий в плоскости (X,Y) сопротивление системы, отображается в плоскости (P,Q) в отрезок  $(-E^2/2X, E^2/2X)$ , также лежащий на оси «jX» (при угле  $\delta=180^\circ$ ):

$$\underline{S} = \underline{I}^2 \underline{Z} = (-E \sin(\delta/2) / X)^2 * jX = jE^2 / X,$$

Характеристика реле направления активной мощности РНАМ в обеих плоскостях совпадает с осью ординат. Кроме того на рис. 3 б показана характеристика реле активной мощности РАМ с уставкой  $P_{уст}$ .

3. Годограф АР при расположении АЛАР в начале системы (частный случай,  $k=1$ )

Годограф АР в плоскости (R,X) отличается в этом случае тем, что он смещён вверх по оси «jX» на половину сопротивления системы – рис. 4 а.

При  $k=1$  полная мощность

$$\underline{S} = (\underline{UI}) = E^2 \sin(\delta/2)(\cos(\delta/2) + j\sin(\delta/2)) / X,$$

активная мощность

$$P = E^2 (\sin(\delta/2) \cos(\delta/2)) / X = E^2 \sin \delta / 2X,$$

реактивная мощность

$$Q = E^2 \sin^2(\delta/2) / X = E^2 (1 - \cos \delta) / 2X.$$

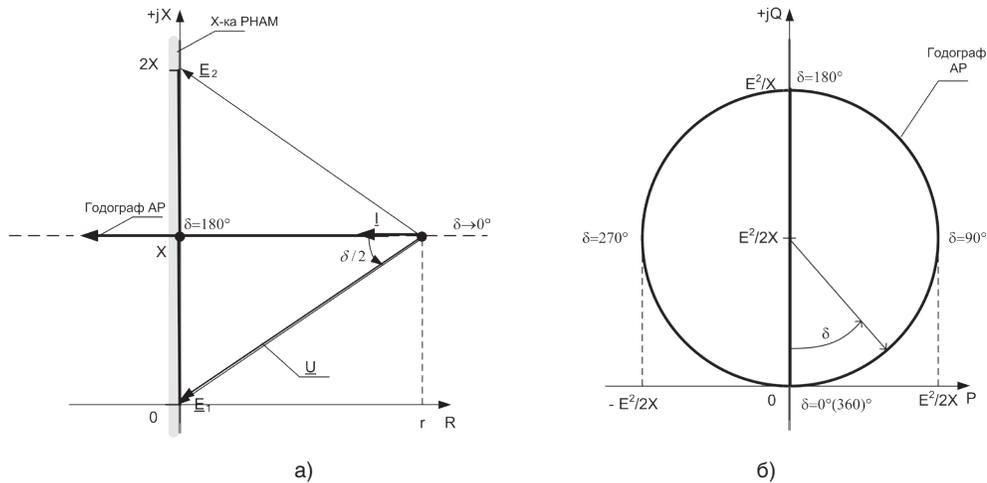


Рис. 4. Годограф AP а) в плоскости (X,Y) и б) - в плоскости (P, Q). Место установки АЛАР – начало системы

Следовательно, в случае установки АЛАР в начале системы годограф AP отображается в плоскости (P,Q) окружностью с радиусом, равным  $E^2/2X$ , и центром в точке  $(0+jE^2/2X)$  – рис. 4 б).

Отрезок  $(0, 2X)$  на оси «jX», изображающий в плоскости (R,X) сопротивление системы, отображается в данном случае в плоскости (P, Q) отрезком  $(0, 2E^2/X)$ , также лежащий на оси «jX» (при угле  $\delta$ , равном  $180^\circ$ ):

$$\underline{S} = \underline{I}^2 \underline{Z} = (-E \sin(\delta/2)/X)^2 * j2X = j2E^2/X.$$

При отрицательном знаке скольжения  $s$  расчёт годографа AP аналогичен, сам годограф расположен в нижней полуплоскости (P, Q).

### Выводы.

1. С изменением места расположения устройства АЛАР в сети меняется форма годографа асинхронного режима в плоскости (P, Q).
2. В устройствах АЛАР, использующих измерительные органы мощности для выявления асинхронного режима, нужно учитывать изменение формы годографа асинхронного

режима в зависимости от места расположения устройства, а также при изменении схемы и состава оборудования сети, что усложняет выбор уставок ИО АЛАР.

#### Литература:

1. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II. М.: Знак, 2011. – 528 с.
2. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

### Сведения об авторах



**Малый Альберт Петрович**  
 Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА». В 1958 г. закончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 г.), старший научный сотрудник.



**Шурупов Алексей Александрович**  
 Заведующий отделом защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». В 1973 г. закончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г.), старший научный сотрудник.

УДК 621.311:621.316.925:004.72

Кошельков И. А., Дони Н.А. , Петров А. А.  
**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА  
АПВ С УЛАВЛИВАНИЕМ СИНХРОНИЗМА**

**Аннотация:** рассмотрен алгоритм измерения частоты, описаны результаты математического моделирования алгоритма.

**Ключевые слова:** частота, контроль синхронизма, терминал релейной защиты.

Koshelkov I.A., Doni N.A., Petrov A.A.

**THE METHOD OF FREQUENCY MEASUREMENT FOR RECLOSING WITH  
CONTROL OF SYNCHRONISM DEVICE**

Abstract: the algorithm of frequency measurement is discussed, simulation results is described.

Keywords: frequency, control of synchronism, IED.

В аналоговых устройствах защиты осуществляется измерение параметров контролируемых синусоидальных величин электрической системы путем воздействия непрерывных аналоговых сигналов, зависящих от входных токов и напряжений, на физическую систему (электромеханическую, микроэлектронную и т.д.). По результатам этого воздействия оценивается нахождение контролируемых параметров в заданной области, на основании чего принимается решение, соответствующее алгоритму работы защиты. Например, срабатывание измерительного органа максимальной токовой защиты, дающего команду реле времени на отсчёт выдержки времени, соответствует при синусоидальном токе превышению его амплитудой заранее заданного значения (действующее значение превышает уставку).

В цифровых измерительных органах (ЦИО) основные операции производятся не с аналоговыми сигналами, а с чередующимися во времени с периодом  $T_d$  последовательностями двоичных чисел,

соответствующими дискретизированным сигналам, полученными при цифровой обработке входных аналоговых сигналов.

Алгоритмом ЦИО называется последовательность операций с цифровыми отсчётами (выборками), зависящими от входных аналоговых сигналов, обеспечивающая измерение контролируемых параметров электрической системы или оценку их нахождения в заданной области [1].

Математически любую аналоговую величину можно представить в виде гармонической функции:  $F(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi)$ , при этом в произвольный момент времени  $t$  нам известны только мгновенные значения сигнала  $F(t)$ . В этом выражении  $A_m$  – это амплитуда периодической функции, а  $(\omega t + \varphi)$  – текущее значение фазы, которое в свою очередь зависит от  $\varphi$  – начального значения фазы и  $\omega$  – частоты. При этом часто считается, что промышленная частота постоянна и равна  $\omega = 50$  Гц. По современным требованиям к качеству электроэнергии нормально допустимое отклонение частоты равно  $\omega_{\text{норм}} = \pm 0,2$  Гц, а предельно допустимое отклонение частоты равно  $\omega_{\text{пред}} = \pm 0,4$  Гц. Причиной отклонения частоты может быть, например, снижение генерируемых мощностей в сети или перегрузка генераторов, как следствие проявляются снижение производительности электроприводов, снижение срока службы электрических машин, увеличение пульсаций, искажения телевизионного изображения [2].

В основе работы цифровых частотомеров лежит метод дискретного счёта. Он основан на счете импульсов измеряемой частоты за известный промежуток времени. Обеспечивает высокую точность измерения в широком диапазоне частот, в том числе и на промышленной частоте 50 Гц.

Это наиболее распространенный современный метод измерения. Низкие частоты, такие как частота промышленной электросети может измеряться путем подсчета импульсов, поступающих от измерительного генератора высокой частоты  $F$ , за один или  $n$  периодов измеряемого тока или напряжения промышленной частоты  $f$  и вычисления значения измеряемой частоты по формуле:  $f = nF/N$ , где

$N$  – количество импульсов от измерительного генератора, полученное за  $n$  периодов промышленной частоты.

Другим способом является подсчет периодов сигнала измеряемой частоты за фиксированное время, например, за 1 секунду.

Использование такого способа определения частоты не даёт нам возможность прогнозирования частоты, в случае её изменения во времени, например, при работе автоматического повторного включения с улавливанием синхронизма (АПВ УС), при ликвидации аварии, в результате которой возник избыток или дефицит мощности.

Для решения этой задачи был разработан алгоритм, представленный на рис. 1. Входная зависимость записывается в буфер кольцевой памяти. Для вычисления точного времени перехода через «ноль», используется полином Лагранжа третьей степени (1).

$$L(x) = \sum_{i=0}^3 y_i l_i(x), \quad (1)$$

где базисные полиномы определяются по формуле:

$$l_i(x) = \prod_{j=0, i \neq j}^3 \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (2)$$

Полученные значения записываются в специальную кольцевую память, на основе данных из двух кольцевых буферов происходит вычисление частоты входного сигнала. Использование полинома Лагранжа для определения времени «смены знака», позволяет по-

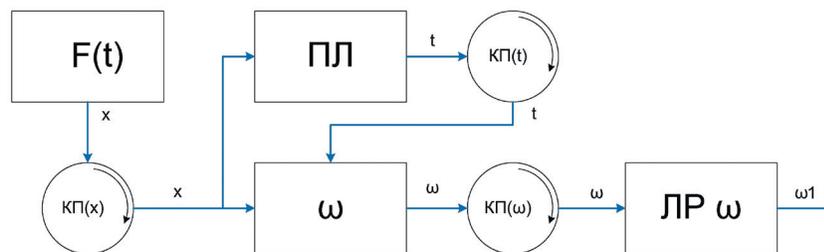


Рис. 1. Упрощенная структурная схема

$F(t)$  – входная зависимость аналоговой величины; КП – кольцевая память; ПЛ – блок полинома Лагранжа;  $\omega$  – блок расчёта частоты; ЛР  $\omega$  – блок линейной регрессии

лучать результат с большей точностью, в сравнении со способом с применением линейной интерполяции. Например, результат, полученный с помощью линейной интерполяции, содержал в себе погрешность в диапазоне от 0,24% до 0,83%. При аналогичных условиях результат с использованием полинома Лагранжа содержал в себе погрешность от 0,13% до 0,51%, что почти в 2 раза меньше. Следующим шагом является прогнозирования частоты с помощью блока линейной регрессии.

К положительным моментам такого алгоритма можно отнести высокую точность вычислений частоты, возможность расчёта частоты в определённый момент в будущем.

К минусам, в первую очередь, относится сложность реализации, по сравнению со способом, описанным выше. Для работы блока полинома Лагранжа используются не только простейшие арифметические операции, но и более сложные, например деление, поэтому для расчёта необходимо выделение дополнительного машинного времени.

С помощью математической модели были проведены исследования алгоритма вычисления частоты с применением полинома Лагранжа в различных условиях.

При использовании в качестве входного сигнала «чистой» синусоиды, представленной на рис. 2, выбранный способ измерения частоты, не только даёт корректный результат в каждый момент времени, но и позволяет делать точный прогноз на 100 мс.

Согласно нормам качества электрической энергии в системах

электроснабжения общего назначения допустимо наличие высших гармоник, наличие которых вызывает рост потерь в электрических машинах, вибрации, нарушение работы автоматики защиты, увеличение погрешностей измерительной

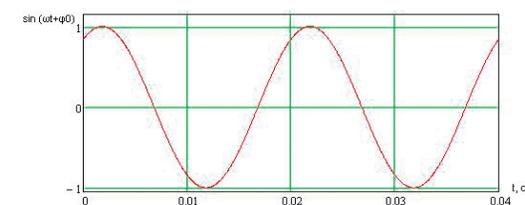


Рис. 2. Входной синусоидальный сигнал. «Чистая» основная гармоника

аппаратуры, отключение чувствительных ЭПУ [2].

В ходе эксперимента к основной гармонике добавлялись предельные значения высших гармоник [2]. В результате получился сигнал с наложением 3% второй гармоники, 3,75% третьей, 1,5% четвёртой и 9% пятой гармоники, рис. 3. Было выявлено, что наличие высших гармоник не создаёт дополнительной погрешности как при вычислении частоты, так и при её прогнозировании.

Исследование алгоритма с использованием входного синусоидального сигнала с линейным законом изменения частоты  $\omega(t) = \omega_1 t + \omega_0$ , представленного на рис. 4, позволило убедиться, что прогнозирование происходит корректно не только тогда, когда частота сигнала неизменна во времени, но и в случаях когда частота изменяется с течением времени.

Основываясь на результатах эксперимента, полученных с помощью математической модели, можно сделать вывод, что способ расчёта частоты с применением полинома Лагранжа совместно с блоком линейной регрессии может быть использован в случаях, когда на базе стандартного устройства МП РЗА необходимо с высокой точностью прогнозировать частоту. Например, для ликвидации аварии с применением устройства АПВ УС, когда в результате отключения возникает дефицит, либо избыток мощности и, как следствие, понижение или повышение частоты части энергосистемы. При этом надо учитывать, что в алгоритме не предусмотрена возможность взаимодействия с системами автоматической частотной разгрузки (АЧР), поэтому при срабатывании

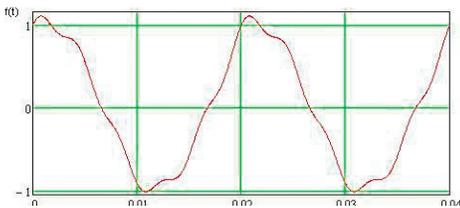


Рис. 3. Входной сигнал  $f(t)$

$$f(t) = \sin(\omega t + \varphi_0) + 0,03 \sin(2\omega t + \varphi_0) + 0,0375 \sin(3\omega t + \varphi_0) + 0,015 \sin(4\omega t + \varphi_0) + 0,09 \sin(5\omega t + \varphi_0).$$

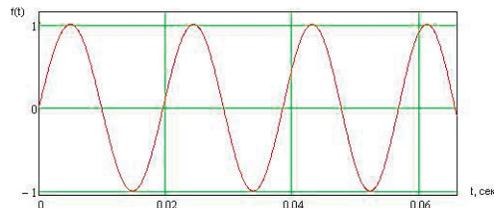


Рис. 4. Входной сигнал  $f(t) = \sin((\omega_1 t + \omega_0)t + \varphi_0)$ .

такой системы прогноз на большой промежуток времени вперёд, превышающий время срабатывания АЧР, может быть неточным.

Литература:

1. Никитин А.А., Шнеерсон Э.М. Аппараты релейной защиты. – Чебоксары.: Издательство Чувашского университета, 2008. – 524 с.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

## Сведения об авторах



### Кошельков Иван Александрович

Инженер 2 категории. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова» в 2010 году. В 2010 году получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Автор 6 научных публикаций в области противоаварийной автоматики и релейной защиты, микропроцессорной техники.



### Дони Николай Анатольевич

Директор по науке - заведующий отделом перспективных разработок. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высококачественной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.



### Петров Андрей Анатольевич

Заместитель заведующего отделом защит подстанционного оборудования. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова» в 2004 году. В 2004 году получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Автор 5 научных публикаций в области релейной защиты и микропроцессорной техники.

УДК 621.311.1.019

Антонов В.И., Шевцов В.М., Наумов В.А.

## ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ

**Аннотация:** обобщены понятия частоты, фазы и амплитуды сигнала электрической сети; рассмотрены современные цифровые методы определения частоты; выполнен анализ цифровых алгоритмов с точки зрения их реализации.

**Ключевые слова:** частота электрической сети, мгновенная частота, цифровые алгоритмы, оценка частоты сети для РЗ и А.

Antonov V.I., Shevtsov V.M., Naumov V.A.

### ESTIMATION THE FREQUENCY OF ELECTRICAL NETWORKS: THEORETICAL BASES AND PRACTICAL ALGORITHMS

Abstract: A Concept of Frequency, Phase and Amplitude of Electrical Network Value are generalized; the Frequency Estimation Modern Digital Methods are considered; the Analysis of Digital Algorithms is done.

Keywords: Frequency of Electrical Network, the Instantaneous Frequency, Digital Algorithms, Estimation of the Network Frequency for Relay Protection.

Частота является важнейшим системным параметром, характеризующим состояние электрической сети и качество электроэнергии [1]. Ее оценка широко используется в различных системах противоаварийной автоматики, таких как автоматическая частотная разгрузка, частотная делительная автоматика, частотное автоматическое повторное включение, автоматическая ликвидация асинхронного режима [2]. Алгоритмы оценки частоты должны обеспечивать необходимый уровень точности и быстродействия в различных режимах работы электрической сети, сопровождающихся изменением

оцениваемого параметра во времени, при наличии в электрической величине высших гармоник, в режимах асинхронного хода различных частей электрической системы.

Цифровые алгоритмы оценки частоты в корне отличаются от предшественников, в связи с чем существует настоятельная потребность оценки современного состояния и анализа тенденций их развития. Именно решению этой задачи посвящена настоящая работа. В ней дается развернутое изложение понятия частоты электрической величины и устанавливается ее связь с частотой электрической сети, излагаются теоретические основы построения алгоритмов оценки частоты и возможные принципы их практического приложения в цифровых системах релейной защиты и автоматики.

### 1. Теоретические предпосылки, определения

**1.1. Амплитуда, фаза и частота сигнала электрической сети в установившемся синусоидальном режиме.** Сигнал электрической сети в этом режиме определяется соотношением

$$x(t) = c \cos \omega t - s \sin \omega t = A \cos(\omega t + \psi) = A \cos \varphi(t) \quad (1)$$

где  $A > 0$  и  $\omega > 0$  – амплитуда и угловая частота (далее для краткости – частота) сигнала,  $c$  и  $s$  – амплитуды ортогональных составляющих (квадратурные компоненты амплитуды  $A$  [3]), связанные с амплитудой  $A$  и начальной фазой  $\psi$  сигнала следующими соотношениями:

$$c = A \cos \psi, \quad s = A \sin \psi, \quad A = \sqrt{c^2 + s^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \left( \frac{s}{c} \right). \quad (2)$$

Аргумент косинусоиды  $\varphi(t)$  называется фазой сигнала; как видно из (1), она равна

$$\varphi(t) = \omega t + \psi.$$

Учитывая, что в (1) частота  $\omega$  постоянна, ее можно определить, измеряя скорость изменения фазы во времени

$$\omega = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (3)$$

или просто путем измерения периода  $T$  [4, 5]

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

В то же время, сигнал (1) можно рассматривать как вещественную часть комплексного сигнала

$$\underline{x}(t) = Ae^{j\varphi(t)}, \quad (4)$$

введя в рассмотрение мнимую часть (сопряженный сигнал [3])

$$y(t) = A \sin \varphi(t).$$

Модуль комплексного сигнала  $\underline{x}(t)$  (4), определяемый как

$$A(t) = |\underline{x}(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (5)$$

будет равен амплитуде, а аргумент

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{y(t)}{x(t)} \right] - \quad (6)$$

фазе исходного сигнала  $x(t)$  (1). Тогда, частоту исходного сигнала можно найти, подставив (6) в (3):

$$\omega(t) = \frac{y'(t)x(t) - x'(t)y(t)}{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (7)$$

где штрихи обозначают производные по  $t$ .

В соотношениях (5)-(7) определяемые величины представляют собой мгновенные значения амплитуды  $A(t)$ , фазы  $\varphi(t)$  и частоты  $\omega(t)$ , поскольку они определяются по мгновенным значениям комплексного сигнала  $\underline{x}(t)$  (4). Однако, для сигнала  $x(t)$  (1) они будут давать теоретически неизменные во времени значения.

**1.2. Амплитуда (огibaющая), фаза и частота сигнала электрической сети в периодическом несинусоидальном режиме.** В общем случае сигнал электрической сети содержит наряду с составляющей основной гармоники частотой  $\omega_1$  другие составляющие частотами  $\omega_n$ , не обязательно кратными основной  $\omega_1$ . Для краткости изложения ограничимся рассмотрением сигнала с двумя составляющими

$$x(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \psi_1) + A_n \cos(n\omega_1 t + \psi_n); \quad (8)$$

где для определенности примем  $n > 1$ . Полученные выводы можно будет распространить и на более сложные сигналы. При  $n$ , близких к единице, сигнал (8) будет соответствовать асинхронному режиму электрической сети с двусторонним питанием, а при целых  $n$ , сигнал (8) будет отражать режим сети при наличии кратной гармоники.

В любом случае, при  $n \neq 1$  в сети возникают биения амплитуды. Сигнал (8) в этом случае можно представить в виде квазигармонического колебания с переменной амплитудой (огibaющей)  $A(t)$  и мгновенной фазой  $\varphi(t)$ , определенной, например, через некоторую среднюю частоту  $\omega_0$  [7]:

$$x(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \psi(t)] = A(t) \cos \varphi(t). \quad (9)$$

Для удобства вычислений снова можно воспользоваться представлением (4), но при определении сопряженного сигнала  $y(t)$  надо помнить, что в этом случае имеем дело с огibaющей  $A(t)$  периодического несинусоидального сигнала:

$$\underline{x}(t) = x(t) + jy(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}. \quad (10)$$

Как и для гармонического сигнала (1), огibaющая  $A(t)$ , фаза  $\varphi(t)$  и мгновенная частота  $\omega(t)$  будут определяться согласно (5) - (7). Отметим, что мгновенная частота  $\omega(t) = \omega_0 + d\psi/dt$  не зависит от выбора  $\omega_0$ , поскольку при изменении  $\omega_0$  соответственно меняется и  $d\psi/dt$  [7].

Известно [6, 7], что при представлении сигнала (8) в форме (9), возникает неоднозначность в выборе функций для огibaющей  $A(t)$  и фазы  $\varphi(t)$ , поскольку для любой выбранной функции  $\varphi(t)$  всегда можно подобрать соответствующую функцию для  $A(t)$ . То же самое свойственно представлению сигнала в виде (10), в связи с чем выбор сопряженного сигнала  $y(t)$  для заданного сигнала  $x(t)$  так же многозначен. Поэтому нужно определить правила задания мнимой части  $y(t)$  в (10) таким образом, чтобы огibaющая была определена однозначно так, чтобы для гармонического сигнала (1) она совпадала с амплитудой  $A$ , а мгновенная частота  $\omega(t)$  – с частотой  $\omega$  гармоники [7].

Важность этого требования к огibaющей становится более ясной, если

скрупулезней изучить свойства определения (5). Дело в том, что независимо от вида сопряженного сигнала  $y(t)$  в моменты времени, когда сопряженный сигнал проходит через нуль, выполняются два равенства:

$$A(t) = x(t),$$

$$A'(t) = x'(t).$$

Это означает, что при любом выборе  $y(t)$  кривая  $A(t)$  касается с сигналом  $x(t)$  в точках, где  $y(t)=0$ . Но лишь один вид сопряженного сигнала  $y(t)$  позволяет выполнить равенство огибающей  $A(t)$  амплитуде  $A$  гармоники при представлении сигнала (1) в форме (10). Им должен быть сигнал, полученный в результате преобразования  $x(t)$  по Гильберту [3, 6, 7]:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

То есть, сопряженный сигнал  $y(t)$  получается в результате свертки исходного сигнала  $x(t)$  с функцией  $1/t$ .

Для гармонического сигнала преобразование Гильберта приводит к повороту начальной фазы на  $-\pi/2$ , в связи с чем существуют следующие соответствия между сигналом и его сопряженным представлением [3]:

$$x(t) = \cos(\omega t + \psi) \leftrightarrow y(t) = \sin(\omega t + \psi), \quad (11)$$

$$x(t) = \sin(\omega t + \psi) \leftrightarrow y(t) = -\cos(\omega t + \psi).$$

Воспользовавшись (11), определим сопряженный к (8) сигнал

$$y(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + A_n \sin(n\omega_1 t + \psi_n).$$

Теперь можно определить огибающую (5):

$$A^2(t) = A_1^2 (1 + k^2 + 2kq)$$

и мгновенную частоту (7):

$$\omega(t) = \omega_1 \frac{1 + nk^2 + k(n+1)q}{1 + k^2 + 2kq}, \quad (12)$$

где  $k = A_n / A_1$ ,  $q = \cos[(n-1)\omega_1 t + \psi_n - \psi_1]$ .

**1.3. Мгновенная частота и частота электрической сети.** В электроэнергетике частота электрической сети определяется как частота электрической величины в установившемся синусоидальном режиме сети. Электрическая величина сети в этом случае представляет собой гармонику основной частоты,

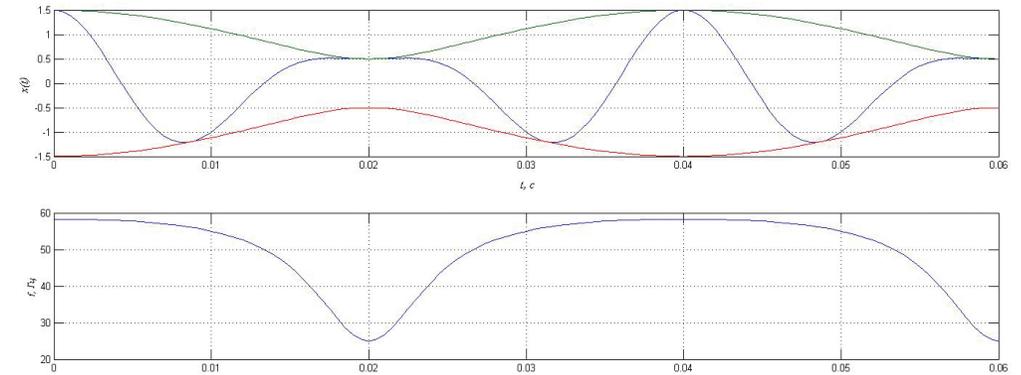


Рис.1. Сигнал  $x(t)$  (8) и мгновенная частота  $f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi}$  при  $\omega_1 = 2\pi 50 \text{ c.}^{-1}$ ,  $k=0,5$ ,  $n=1,5$ ,  $\psi_n = \psi_1 = 0$ .

и мгновенная частота  $\omega(t)$ , определяемая согласно (7), будет (теоретически) неизменна во времени и равна частоте этой гармоники. Очевидно, что такое определение частоты требует от алгоритмов оценки частоты сети способность исключать из сигнала высшие гармоники и составляющие свободного процесса или оценивать частоту только на стационарных участках сигнала [8]. Отсюда следует, что представление сигнала (8) в форме (10) при  $n \gg 1$  неприемлемо с точки зрения определения частоты сети, поскольку мгновенная частота  $\omega(t)$ , определенная по (3) или (12), не соответствует частоте основной гармоники сигнала. В связи с этим понятие мгновенной частоты  $\omega(t)$  может использоваться лишь для оценки динамики изменения частоты электрической величины, поступающей на вход измерительных органов [9], но не для оценки частоты сети. В этом коренное отличие алгоритмов определения частоты сети в системах релейной защиты и противоаварийной автоматики и именно эта предпосылка определяет весь спектр особенностей алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем, так или иначе связанных с оценкой частоты электрической сети.

Как уже отмечалось, в нормальном режиме работы электрической сети электрические величины содержат только одну

основную гармонику (1), частота которой и определяет частоту сети. Однако, в случае асинхронного режима сети, частоты вращения генераторов будут не одинаковы, и, к примеру, в двух генераторной сети электрические величины будут содержать две гармоники, частоты которых близки к номинальной частоте сети [10, 11], в связи с чем понятие основной гармоники теряет смысл. Алгоритмы, так или иначе использующие спектральные составляющие [12, 13], будут давать усредненные оценки частот, близкие к половине суммы частот гармоник. Класс алгоритмов, основанных на предположении о синусоидальности входного сигнала и использующие мгновенные величины [14], будут иметь оценки, тяготеющие к мгновенной частоте  $\omega(t)$ .

Ясно, что для объективной оценки частоты сети нужно знать частоту обеих гармоник, порождаемых генераторами сети. Представляется, что для однозначности оценок будет правильным считать за частоту сети частоту вращения ведущего генератора, полагая, что частота генератора дефицитной части сети «проскальзывает» относительно частоты вращения ведущего генератора. Таким образом, алгоритмы оценки частоты сети, предназначенные для работы в режиме асинхронного режима сети, должны обладать способностью разделить сигнал на две гармоники с близкими частотами [15, 16]. Наиболее приспособлены для этого алгоритмы, использующие адаптивные структурные модели сигналов [17,18].

## 2. Практические алгоритмы оценки частоты.

**2.1. Оценка частоты сети с помощью ортогональных составляющих.** Начала метода восходят к теории связи, а именно, к разделу демодуляции [19]. Очевидно, что сигналы электроэнергетических систем существенно отличаются от сигналов в системах связи. Поэтому алгоритмы оценки

ортогональных составляющих величины электрической сети имеют свои особенности.

В самом общем случае для определения ортогональных составляющих сигнала (1) формируется комплексный сигнал

$$\underline{x}(t) = 2x(t)e^{-j\omega_0 t}, \quad (13)$$

вещественная

$$c_M(t) = 2x(t) \cos \omega_0 t = c_F(t) + c \cos(n_\omega + 1)\omega_0 t - s \sin(n_\omega + 1)\omega_0 t \quad (14)$$

и мнимая

$$s_M(t) = -2x(t) \sin \omega_0 t = s_F(t) - c \sin(n_\omega + 1)\omega_0 t - s \cos(n_\omega + 1)\omega_0 t \quad (15)$$

части которого согласуются с ортогональными составляющими сигнала (1). Здесь  $e^{j\omega_0 t}$  – опорный (модулирующий) сигнал, его ортогональный базис

$$\{\cos \omega_0 t, -\sin \omega_0 t\} \quad (16)$$

состоит из двух гармонических составляющих частотой  $\omega_0$ ,

$$c_F(t) = c \cos(n_\omega - 1)\omega_0 t - s \sin(n_\omega - 1)\omega_0 t \quad (17)$$

и

$$s_F(t) = c \sin(n_\omega - 1)\omega_0 t + s \cos(n_\omega - 1)\omega_0 t \quad (18)$$

низкочастотные составляющие компонентов сигнала (13),  $\omega_0$  – номинальная частота сети,  $n_\omega = \omega/\omega_0$  – коэффициент расстройки частоты сети. Низкочастотные составляющие  $c_F(t)$  и  $s_F(t)$  представляют собой ортогональные составляющие сигнала (1), сформированные относительно базиса опорного сигнала(16). Для их определения в (14) и (15) необходимо подавить составляющие боковой частоты

$$\omega_\Sigma = (n_\omega + 1)\omega_0 \quad (19)$$

В общем случае, когда частота  $\omega$  сигнала не совпадает с частотой  $\omega_0$  опорного сигнала, ортогональные составляющие, как это видно из (17) и (18), изменяются разностной частотой

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = (n_\omega - 1)\omega_0. \quad (20)$$

Полагая, что в (14) и (15) составляющие боковой частоты  $\omega_\Sigma$  удалены, получим новый комплексный сигнал, соответствующий по

форме выражению (4):

$$\underline{g}(t) = Ae^{j\varphi(t)},$$

где  $A$  вычисляется согласно (5) как

$$A = \sqrt{c_F^2(t) + s_F^2(t)}$$

и равна значению по (2), а фаза определяется как и в (6):

$$\varphi(t) = \tan^{-1} [s_F(t) / c_F(t)].$$

Частота ортогональных составляющих  $\Delta\omega$  вычисляется по (7) с учетом очевидных соответствий. Мгновенная частота  $\omega(t)$  сигнала  $x(t)$  определяется из (20). Она будет постоянной (теоретически) и равной частоте  $\omega$  сигнала (1).

Таким образом, для оценки частоты по ортогональным составляющим, нужно получить оценки (17) и (18). Как уже отмечалось, для этого нужно подавить составляющие боковой частоты (19). Существует несколько способов решения этой задачи, и все они так или иначе связаны с использованием фильтров. Рассмотрим эти возможности (учитывая, что реализация алгоритмов оценки частот обычно производится в цифровой среде, дальнейшее изложение материала будем вести для цифровых сигналов).

*Классический фильтр Фурье.* Этот фильтр получил наибольшее распространение благодаря простоте его реализации и способности подавлять кратные гармоники. Принимая, что отсчеты

$$\underline{x}(k) = 2x(k)e^{-jk\omega_0 T_s}, \quad (21)$$

формируемые из (13) в дискретные моменты  $t_k = kT_s$ , усредняются на отрезке, равном длине периода опорного сигнала  $T_0 = 2\pi/\omega_0 = NT_s$ , получим следующие выражения для оценок ортогональных составляющих:

$$\begin{Bmatrix} \hat{c}_F(k) \\ \hat{s}_F(k) \end{Bmatrix} = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k \begin{Bmatrix} c_M(k) \\ s_M(k) \end{Bmatrix}, \quad (22)$$

где  $T_s$  – период дискретизации,  $N$  - число отсчетов на периоде  $T_0$  опорного сигнала.

Из (14) и (15) видно, что классический фильтр Фурье (22) будет иметь методическую погрешность, вызванную недостаточ-

ным подавлением составляющих боковой частоты  $\omega_{\Sigma}$ , поскольку усреднение осуществляется на отрезке  $T_0$ , а не на отрезке, кратном  $T_{\Sigma} = 2\pi/\omega_{\Sigma}$ . Его несомненным недостатком является и то свойство, что первые оценки ортогональных составляющих появляются лишь по прошествии периода опорного сигнала.

*Заграждающие фильтры и фильтры Фурье с коротким (неполным) окном.* Оператор заграждения  $n$ -ой гармоники представляет собой фильтр второго порядка

$$e(k) = B_2 \{x(k)\} = x(k) + ax(k-1) + x(k-2), \quad a = -2 \cos(n\omega T_s), \quad (23)$$

где  $e(k)$  – выход фильтра,  $B_2 \{x(k)\}$  – обозначение оператора заграждения второго порядка, подвергающего преобразованию сигнал  $x(k)$ . При  $n=2$  и  $\omega = \omega_0$  оператор (23) пригоден для подавления составляющих боковой частоты в (14) и (15). И его использование в составе классического фильтра Фурье (22) существенно повышает точность оценки частоты, правда, за счет увеличения времени отклика фильтра на 3 отсчета.

В то же время, использование заграждающих операторов вносит новое качество в процедуру определения ортогональных составляющих, позволяя строить фильтры Фурье, не требующие усреднения строго на отрезке периода опорного сигнала. В итоге получаются фильтры с сокращенным окном усреднения ( $R$  – ширина окна):

$$\begin{Bmatrix} \hat{c}_F(k) \\ \hat{s}_F(k) \end{Bmatrix} = \frac{1}{R} \sum_{m=k-R+1}^k \begin{Bmatrix} c_B(k) \\ s_B(k) \end{Bmatrix},$$

где  $c_B(k) = B_2 \{c_M(k)\}$  и  $s_B(k) = B_2 \{s_M(k)\}$  – результат применения заграждающего преобразования (23) к  $c_M(k)$  и  $s_M(k)$  из (14) и (15).

$$e(k) = B_1 \{x(k)\} = x(k) - e^{-\beta T_s} x(k-1), \quad (24)$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания аperiodической составляющей. Поскольку фильтр Фурье лишен способности к адаптации, то коэффициент  $\beta$  принимается равным нулю, превращая тем самым оператор (24) в оператор подавления постоянной составляющей.

В случае зашумленности сигнала  $x(k)$  высшими гармониками приходится дополнять фильтр Фурье с коротким окном заграждающим оператором  $B_q\{x(k)\}$  [20, 22], включающим в себя несколько фильтров вида (23) (например, для  $n=3$  и 5). Порядок заграждающего оператора  $q$  выбирается исходя из порядка подавляемой части сигнала  $x(k)$ . Сигнал  $x(k)$  вначале подвергается преобразованию заграждающим оператором и только потом умножается на комплексный опорный сигнал:

$$\underline{x}(k) = 2B_q\{x(k)\}e^{-jk\omega_0 T_s}. \quad (25)$$

В [21] вместо удаления аperiodической составляющей из сигнала  $x(k)$  предлагается использовать заграждающий фильтр опорного сигнала (23), но уже после преобразования сигнала  $x(k)$  согласно (21) или (25).

Понятно, что для сохранения точности оценки частоты необходимо изменять частоту опорного сигнала  $\omega_0$  в зависимости от степени расстройки  $n_\omega$  частоты сети, подгоняя ее ближе к  $\omega$ . Только в этом случае будет обеспечена высокая степень подавления высших гармонических и составляющей боковой частоты  $\omega_\Sigma$ . Для этого фильтр нужно снабдить системой автоподстройки частоты опорного сигнала. Как это можно сделать, показано в разделе 7, посвященном определению частоты сети с помощью адаптивных заграждающих моделей сигнала.

**2.2. Оценка частоты сети с помощью операторов с частотнозависимыми характеристиками.** Наиболее характерным примером является алгоритм Сези (Sezi) [23]. Известен также его адаптированный вариант [24] для применения в сети с номинальной частотой 50 Гц. Алгоритм использует двухканальную обработку сигнала сети после полосового подавления постоянной составляющей и составляющих верхних частот (начиная с частоты  $2\omega_0$ ). Первый канал является всепропускающим фильтром и формирует величину, амплитуда которой пропор-

циональна амплитуде сигнала основной гармоники  $A_1(\omega)$ . Вторым каналом формируется сигнал, амплитуда которого явно зависит от частоты:

$$A_2(\omega) = A_1(\omega)(1 + \cos m_0 \Omega),$$

где  $\Omega = 2\pi(\omega/\omega_s)$ ,  $\omega_s = 2\pi/T_s$  – частота дискретизации. Коэффициент  $m_0$  должен выбираться из условия, чтобы при  $\omega = \omega_0$  достигалось равенство  $m_0 \Omega_0 = \pi/2$ . Амплитудно-частотная характеристика канала плавно уменьшается с 2 при  $\omega = 0$  до 0 при  $\omega = 2\omega_0$ . Частота сети определяется из выражения

$$\Omega = (1/m_0) \cos^{-1} \left[ \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} - 1 \right],$$

Алгоритм позволяет иметь стабильную оценку за 3,5 периода основной гармоники. Но любое скачкообразное изменение входного сигнала будет вызывать собственный переходный процесс алгоритма продолжительностью тех же 3,5 периода основной частоты.

Таким образом, алгоритм [23] имеет повышенную инертность, но обладает стабильно высокой и не зависящей от частоты сети точностью благодаря двухканальности обработки, которая позволяет избежать разбалансировки алгоритма при частоте сети, отличной от номинальной.

**2.3. Оценка частоты сети с помощью адаптивных структурных моделей сигнала.** Как известно [17, 25], цифровой сигнал электроэнергетической системы может быть представлен с помощью адаптивных структурных моделей. Полная настройка модели означает, что невязка

$$e(k) = \sum_{m=0}^M a_m x(k-m) \quad (26)$$

удовлетворяет критерию наименьших квадратов

$$E(k) = \min_{a_m} \sum_{l=k-n+1}^k e^2(l). \quad (27)$$

Здесь  $M$  – порядок модели,  $n \geq M$  – число отсчетов невязок (26). Минимизация критерия (27) производится подбором коэффициентов модели  $a_m$ . Классическое решение задачи метода наименьших квадратов в виде переопределенной системы уравнений [26] или в виде нормальных уравнений ортогональности невязки  $e(k)$  и сигнала  $x(k)$  не дают удовлетворительного решения, поскольку в системе появляются линейнозависимые уравнения. Чтобы избежать вырождения задачи наименьших квадратов, прибегают к использованию аппарата сингулярного разложения матрицы плана [18, 27]. Учитывая, что метод сингулярного разложения требует больших вычислительных ресурсов и не позволяет контролировать достоверность модели в процессе настройки, в работе [28] предложен метод построения цифровых моделей, не уступающий по точности методам сингулярного разложения, обеспечивающий постоянный контроль достоверности результата настройки и не требующий больших вычислительных ресурсов.

Правильно настроенная модель несет всю информацию о сигнале, каким бы он ни был сложным, в корнях своего характеристического уравнения

$$\sum_{m=0}^M a_m z^{-m} = a_0 \prod_{m=0}^M (z - \underline{\xi}_m) = 0,$$

согласующихся с корнями изображения  $X(z)$  сигнала  $x(k)$  следующим образом[25]:

$$\underline{z}(p_i) = e^{p_i T_s} = \underline{\xi}_i = \sigma_i + j\zeta_i$$

или

$$p_i T_s = \beta_i T_s + j\omega_i T_s = \ln \underline{\xi}_i = \ln |\underline{\xi}_i| + j \tan^{-1}(\zeta_i / \sigma_i). \quad (28)$$

Частоту основной гармоники можно будет определить по (28), используя соответствующую ей сопряженную пару корней  $\underline{\xi}_{i, i+1} = \sigma_i \mp j\zeta_i$ :

$$\hat{\omega}_i = (1/T) \tan^{-1}(\zeta_i / \sigma_i). \quad (29)$$

Модель (26) способна распознать сигнал любой слож-

ности, в связи с чем использующий ее алгоритм оценки частоты может работать и в переходных режимах электрической сети.

В случае асинхронного режима сети в сигнале будут присутствовать одновременно две основные гармоники. Адаптивные структурные модели отведут им по паре сопряженных корней вида (28), и соответствующие частоты гармоник можно будет так же опеределить по (29).

#### 2.4. Оценка частоты сети в периодическом несинусоидальном режиме с помощью адаптивных заграждающих моделей сигнала[8, 29, 30].

В периодическом режиме работы сети нет необходимости использовать сложную модель (26). Ее можно упростить, выделив из нее операторы заграждения (модели отдельных гармонических составляющих) (23), включаемых каскадно. Их задача заключается в выделении из сигнала основной гармоники. В алгоритмах, предназначенных для работы в системах релейной защиты и противоаварийной автоматики электроэнергетических систем наиболее характерно использование операторов третьей и пятой гармоник (количество используемых операторов с точки зрения структуры излагаемых далее алгоритмов несущественно). Оператор заграждения, способный подавить 3-ю и 5-ю гармоники, будет представлен согласно (23) моделью двух гармоник:

$$y(k) = x(k-4) + (a_3 + a_5)[x(k-3) + x(k-1)] + (2 + a_3 a_5)x(k-2) + x(k). \quad (30)$$

где

$$a_i = -2 \cos i\omega T_s, \quad i = 3, 5; \quad (31)$$

$\omega$  – частота основной гармоники. В итоге сигнал на его выходе должен будет содержать лишь основную гармонику

$$y(k) = Y_m \sin(k\omega T_s + \psi),$$

моделью которого служит (23) при  $n=1$ . Поэтому оценка частоты сети

$$\hat{\omega} = (1/T_s) \cos^{-1}(-a/2). \quad (32)$$

Во избежание влияния шумов на оценку частоты (32) коэффициент  $a$  определяется по методу наименьших квадратов по критерию (27) при  $a_m = a$  и  $M=2$  на заданном отрезке дискретного времени  $[k-n+1, k]$ ,  $n \geq 1$ . Тогда оценка коэффициента

$$\hat{a} = - \frac{\sum_{l=k-n+1}^k [y(l-2) + y(l)] y(l-1)}{\sum_{l=k-n+1}^k y^2(l-1)}.$$

Для повышения стабильности оценки частоты можно использовать модель второго порядка с двумя адаптивными коэффициентами

$$e(k) = (k) + a_1 (k-1) + a_2 (k-2). \quad (33)$$

Модель (33) настраивается также по критерию (27), а искомая частота определяется как

$$\hat{\omega} = (1/T_s) \tan^{-1} \frac{\sqrt{4a_2 - a_1^2}}{-a_1}. \quad (34)$$

Благодаря второму коэффициенту модель сгладит нестабильность оценки частоты, позволяя уменьшать влияние шумов вычислений за счет представления сигнала затухающей синусоидальной составляющей [31].

Контроль точности оценки частоты по (32) и (34) можно вести по принципу инвариантности оцениваемого параметра [17], согласно которому алгоритм определяет, что оценка частоты достигла необходимой точности  $\varepsilon$ , если она не покидает пределы линейной полосы длиной  $n_\varepsilon$ .

Поскольку характеристики оператора (30) зависят от частоты, то для сохранения его заграждающих свойств нужно подстраивать коэффициенты (31) в соответствии с текущей оценкой частоты. Поэтому алгоритм каждый раз после получения оценки частоты изменяет коэффициенты заграждающего оператора (30). Очевидно, что на первых

итерациях настройки заграждающего оператора (30) точность определения частоты будет недостаточна, но среднее значение оценки позволит приблизить частоты заграждения высших гармонических к реальным частотам гармоник, улучшая их заградительные свойства. Это позволит уменьшить смещение оценки частоты на следующей итерации, что приводит к возникновению в алгоритме своего рода положительной обратной связи, ускоряющей сходимость процесса оценки частоты. Как показано в [8], число итераций в алгоритме не превышает 6. Частота сети определяется за 1,5-2 периода основной гармоники.

Такой же алгоритм подстройки частоты можно использовать в настройке заграждающего фильтра боковой частоты в алгоритме с фильтром Фурье с коротким окном (раздел 4).

### Выводы:

1. Под частотой электрической сети для целей релейной защиты и противоаварийной автоматики понимается, как правило, частота основной гармоники электрической величины, поступающей на входы систем релейной защиты.
2. Для обеспечения однозначного толкования алгоритмов определения частоты, использующих оценку мгновенной частоты электрической величины, целесообразно использовать понятие аналитического сигнала, вещественная часть которого представлена самим сигналом электрической сети, а мнимая часть является сопряженным к сигналу электрической сети по Гильберту.
3. Максимальная эффективность и высокая точность алгоритмов оценки частоты достигается использованием адаптивных структурных моделей сигналов, способных работать как в периодических несинусоидальных (включая

и асинхронный режим), так и переходных режимах электрической сети, содержащих апериодические и затухающие синусоидальные составляющие.

4. Среди алгоритмов, основанных на использовании ортогональных составляющих, наиболее эффективны с точки зрения быстродействия алгоритмы с использованием фильтров Фурье с неполным окном, дополненных заграждающими операторами с настраиваемыми частотами заграждения боковых и высших гармоник.
5. Алгоритмы, использующие системы с частотно зависимыми характеристиками, обеспечивают точность оценки, сравнимую с точностью алгоритмов с заграждающими операторами, но алгоритмически более сложны.

#### Литература:

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
3. Вакман Д.Е., Вайнштейн Л.А. Амплитуда, фаза, частота – основные понятия теории колебаний. Успехи физических наук, т. 123, вып. 4, 1977, с. 657 - 682.
4. Козлов В.Н., Лямец Ю.Я., Шевцов В.М., Ефимов Н.С. Реле частоты./Авт. свидетельство СССР №982114. 1982. Бюл. изобр. №46.
5. Đurić M.B., Đuričić Ž.R. Frequency measurement of distorted signals using Fourier and zero crossing techniques. Electric Power Systems Research. Vol. 78, Issue 8, August 2008. P. 1407-1415.
6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.
7. Финк Л.М. Сигналы, помехи, ошибки... (Заметки о некоторых неожиданностях, парадоксах и заблуждениях в теории связи) – М.: Связь, 1978. – 272 с.
8. Антонов В.И., Ильин А.А., Лазарева Н.М. Адаптивные алгоритмы оценки частоты сети для цифровых систем релейной защиты и автоматики. Электротехника, 1995, №8, с.29-31.
9. Максимов Б.К., Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Журавлев Д.М. Мониторинг частоты в переходных режимах работы электрической сети. Электричество, 2010, №4, с. 13-16.
10. Старцева Т.Б., Успенский М.И., Уфимцев Г.В. Определение частот электроэнергетических систем в аномальных режимах микропроцессорными средствами. Серия препринтов «Научные доклады». Коми научный центр УрО АН СССР, 1988, вып.185, – 20 с.
11. Павлов Г.М., Меркуров Г.В. Автоматика энергосистем. – С.-Петербург: Центр подготовки кадров РАО УЭС России, 2001. – 388 с.
12. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Appli-

cations. - Springer Science+Business Media, LLC, 2008. – 247 p.

13. Jun-Zhe Yang, Chi-Shan Yu, Chih-Wen Liu. A New Method for Power Signal Harmonic Analysis. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 20, No. 2, April 2005, p. 1235-1239.
14. Богаченко Д.Д., Овчаренко Н.И., Шитов Р.В. Быстродействующее измерительное преобразование промышленной частоты для автоматики электроэнергетических систем. Электротехника, 2008, №3, с. 11-13.
15. Успенский М.И., Уфимцев Г.В., Старцева Т.Б. Разделение частот в аномальных режимах электроэнергетических систем. Серия препринтов сообщений «Автоматизация научных исследований». Коми научный центр УрО АН СССР, 1989, вып.15. – 16 с.
16. Успенский М.И., Шумилова Г.П. Выявление параметров асинхронного режима по кривым тока и напряжения. Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Чуваш. ун-т. Чебоксары. 1992. С. 57-62.
17. Антонов В.И., Лазарева Н.М., Пуляев В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем. М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик». 2000. - 83 с.
18. Łobos T., Kozina T., Koglin H.-J. Power System Harmonic Estimation using Linear Least Squares Method and SVD. IEE Proc., Gener. Transm. Distrib. Vol. 148, No. 6, November 2001, p. 567-572.
19. Возенкрафт Дж., Джекобс И. Теоретические основы техники связи. М.: Мир. 1969. – 640 с.
20. Антонов В.И., Лазарева Н.М., Шевцов В.М. Неадаптивные алгоритмы оперативной обработки сигналов релейной защиты и автоматики. Вестник Чувашского университета. 1995. №2. С. 87-93.
21. Лямец Ю.Я., Николаев И.Н. Бреслеровская структура цифровой обработки сигналов релейной защиты. Труды АЭН Чувашской республики, 2005, №1, с. 41-58.
22. Антонов В.И., Антонов Д.А., Лазарева Н.М., Пуляев В.И. Оперативная обработка цифровых осциллограмм электрической сети. Вестник Чувашского университета. 1996. №1. С. 61-66.
23. Sezi T. A New Method for Measuring Power System Frequency. IEEE Transmission and Distribution Conference. Vol. 1, p 400-405. New Orleans, 11-16 Apr. 1999.
24. Mañana M., Rodríguez J. A., Sánchez F. J., Ortiz A., Eguíluz L. I.. Frequency measurement under non-sinusoidal conditions. Inter. Conf. on Renewable Energy and Power Quality (ICRE PQ'04). Barcelona, 31 March, 1, 2 April, 2004 . Paper 295.
25. Антонов В.И., Ильин А.А., Лазарева Н.М. Адаптивные структурные модели входных сигналов релейной защиты и автоматики // Электротехника, 2012, №1, с.52-55.
26. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения: Пер. с англ./Под ред. Г.И. Марчука. М.: Мир. 1980.– 454 с.
27. Антонов В.И., Лямец Ю.Я. Разрешающая способность метода наименьших квадратов при оценивании основной гармоники тока короткого замыкания// Изв. вузов. Энергетика. 1990. №2. С. 48-51.
28. Антонов В.И., Лазарева Н.М. Решетчатый адаптивный фильтр с контролем достоверности результата для распознавания сигналов электрических систем. Изв. РАН. Энергетика. 1997. №6. С. 63-69.
29. Антонов В.И., Ильин А.А., Шевцов В.М. Способ определения частоты электрической сети./Патент РФ №2110804. 1998. Бюл. изобр. №13.
30. Łobos T., Rezmer J. Real-Time Determination of Power System Frequency. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. 46, No. 4, August 1997.
31. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Арсентьев А.П. Спектральный анализ переходных процессов в электрических сетях. Изв. РАН. Энергетика. 1992. №2. С. 31-43.

## Сведения об авторах



### **Антонов Владислав Иванович**

Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н. Окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1978 г. Автор 134 научных статей и изобретений в области противоаварийной автоматики и релейной защиты, цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.



### **Наумов Владимир Александрович**

Окончил в 2001 г. электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета по специальности инженер, в 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заведующий отделом РЗА станционного оборудования ООО «НПП ЭКРА».



### **Шевцов Виктор Митрофанович**

Заместитель технического директора по науке — заведующий техническим отделом. Родился в 1939 г. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1961 г. Кандидат технических наук, проф. каф. ТОЭ и РЗА ЧГУ, научный руководитель ПНИЛ «Цифровая электротехника», заслуженный изобретатель ЧР. Автор 56 изобретений в области электротехники, противоаварийной автоматики и релейной защиты. Имеет более 100 научных публикаций в области нелинейной электротехники, электроэнергетики и микропроцессорной техники.

УДК 621.311:621.316.925:004.72

Кошельков И.А., Дони Н.А., Петров А.А.

## ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С КОНТРОЛЕМ СИНХРОНИЗМА

**Аннотация:** рассмотрены особенности АПВ с КС линий с двухсторонним питанием.

**Ключевые слова:** АПВ, контроль синхронизма, терминал релейной защиты.

Koshelkov I.A., Doni N.A., Petrov A.A.

### THE FUNCTIONS OF RECLOSING WITH CONTROL OF SYNCHRONISM ON POWER LINES WITH TWO-WAY FEED

Abstract: The functions of reclosing with control of synchronism on power lines with two-way feed is discussed.

Key words: reclosing, control of synchronism, IED.

К современным энергетическим установкам предъявляются весьма жесткие требования в отношении обеспечения высокой надежности, бесперебойности и экономичности энергоснабжения потребителей [3]. Большая роль в выполнении этих требований возлагается на устройства релейной защиты (РЗ) и системной автоматики. При отключении линии электропередачи (ЛЭП) устройствами РЗ наиболее эффективным средством, предотвращающим развитие аварийной ситуации, является устройство автоматического повторного включения (АПВ). Наиболее актуальна установка устройств АПВ на сильно загруженных магистральных ЛЭП, где отключение линии вызывает внезапные скачкообразные нарушения баланса мощностей, что обычно приводит к развитию аварии. Различают два основных вида АПВ линии: несинхронное («слепое») АПВ и АПВ с контролем синхронизма (КС).

Для ликвидации неустойчивых повреждений на линиях с двусторонним питанием, осуществляющих связь двух источников, которыми могут являться электростанции, энергосистемы или части энергосистем, надо производить отключение выключателей со стороны каждого из источников. Этим определяется одна из особенностей осуществления АПВ таких линий, заключающаяся в необходимости установки устройств АПВ на выключателях обоих их концов и обеспечении определенного взаимодействия этих устройств. Другая особенность осуществления АПВ линий с двусторонним питанием связана с тем, что при их отключении возможно нарушение синхронной работы связываемых ими источников питания. Нарушение синхронизма может иметь место вследствие того, что аварийное отключение линии с двусторонним питанием, если она является единственной линией связи, по которой осуществляется транзит мощности, или если имеющиеся, кроме нее, шунтирующие связи обладают малой пропускной способностью, может привести к тому, что в одной части системы возникнет дефицит мощности и, следовательно, понижение частоты, а в другой – избыток мощности и повышение частоты. Поэтому при осуществлении АПВ в подобных случаях приходится считаться с возможностью несинхронных включений и принимать специальные меры, чтобы не допускать таких включений, если они представляют опасность для оборудования или нет уверенности, что они завершатся ресинхронизацией системы.

Принятие специальных мер для недопущения несинхронных включений в цикле АПВ требуется не всегда. Они не нужны в сетях с большим числом шунтирующих связей, когда отключение одной из них не приводит к нарушению синхронизма благодаря сохранению в работе других линий, имеющих достаточную пропускную способность.

Указанные меры не требуются на одиночных линиях, где

включение при любых углах сдвига фаз встречных напряжений не представляет опасности для оборудования, а возникающий после несинхронного включения кратковременный асинхронный режим завершается ресинхронизацией частей системы. Такой способ выполнения АПВ получил название несинхронного АПВ (НАПВ). В таких мерах нет необходимости и при осуществлении быстродействующего АПВ (БАПВ), при котором благодаря быстродействию устройств релейной защиты линии и выключателей полное время цикла АПВ не превышает 0,25–0,5 с (в зависимости от напряжения линии). В этих условиях к моменту повторного замыкания транзита векторы э. д. с. разделившихся частей системы не успевают разойтись по фазе на значительный угол. При БАПВ, таким образом, включение также производится несинхронно, но в условиях, более легких, чем при НАПВ.

Возможность применения указанных способов АПВ в каждом конкретном случае должна проверяться расчетным путем для наиболее неблагоприятных условий.

В тех случаях, когда применение перечисленных выше способов АПВ не представляется возможным, при осуществлении АПВ оказывается необходимым производить проверку допустимости включения по условию синхронизма встречных напряжений. Она осуществляется с помощью специальных органов, обеспечивающих определенную последовательность действий устройств АПВ на разных концах линии и запрещающих АПВ в случаях, когда включение недопустимо. Эти органы, исключая возможность несинхронных включений, состоят из реле, контролирующего наличие напряжения на линии, и реле контроля синхронизма, реагирующего на разность векторов напряжений на линии и шинах. Благодаря этим реле после аварийного отключения линии с обеих сторон сначала производится АПВ выключателя на одном из концов линии при условии, что напряжение на

линии отсутствует; повторное включение выключателя на другом конце линии производится, если АПВ выключателя, включавшегося первым, было успешным и напряжения на линии и шинах синхронны или угол сдвига их фаз не превосходит допустимого.

Устройства АПВ, дополненные указанными выше органами контроля допустимости повторного включения, получили общее название устройств АПВ с контролем (проверкой) синхронизма и имеют две разновидности: устройства АПВ с ожиданием синхронизма (АПВ ОС) и устройства АПВ с улавливанием синхронизма (АПВ УС).

Первые (АПВ ОС) предназначаются для осуществления АПВ линий, имеющих несколько достаточно мощных шунтирующих связей. Они обеспечивают АПВ отключившейся линии лишь при сохранении в работе этих связей, т.е. при условиях, когда возможно сохранение синхронности работы источников питания. Имеющиеся в них органы контроля запрещают АПВ при нарушениях синхронизма, неизбежных при отключении шунтирующих связей. Обеспечиваемое этими устройствами «ожидание» синхронизма позволяет осуществлять АПВ после затухания качаний, возможных вследствие резкого возмущения в системе, вызываемого КЗ и отключением линии.

Вторая разновидность устройств (АПВ УС) предназначается для осуществления АПВ линий, при отключении которых вследствие отсутствия шунтирующих связей или малой пропускной способности последних происходит нарушение синхронной работы частей системы. Содержащиеся в них органы контроля разрешают подачу импульса на включение лишь в определенном диапазоне разности частот с опережением момента совпадения фаз. Благодаря такому выполнению органов контроля эти устройства при скольжении, неизбежном в случае размыкания транзита, обеспечивают «улавливание» момента для осуществления АПВ.

Таким образом, различие в действии устройств АПВ ОС и АПВ УС заключается в том, что первое обеспечивает АПВ линии либо сразу по истечении выдержки времени устройства АПВ (при сохранении синхронизма), либо после «ожидания» таких условий, когда скольжение, вызванное возмущением в системе, уменьшится до допустимых значений, а второе обеспечивает АПВ линии при нарушении синхронизма путем улавливания наиболее благоприятного момента посылки импульса на включение в условиях не только значительного, но и не уменьшающегося скольжения.

При отключении одиночной транзитной линии, осуществляющей связь отдельной электростанции с системой, расхождение частот может оказаться столь значительным, что рассмотренные выше способы осуществления АПВ не смогут быть применены. В большинстве таких случаев оказывается возможным и целесообразным производить АПВ линий в сочетании с действием устройств автоматики, обеспечивающих в цикле АПВ перевод генераторов отделившейся электростанции в асинхронный режим или их отключение с гашением поля возбуждения и последующим автоматическим включением в работу методом самосинхронизации при успешном АПВ линии (АПВС).

Если отключение одиночной транзитной линии связи приводит к резкому нарушению баланса генераторной мощности и нагрузки в разделившихся частях системы, а применение указанных выше способов АПВ по каким-либо причинам не представляется возможным, то восстановление нормального питания потребителей может быть произведено способом, получившим название АПВ на выделенный район. В этом случае в той части системы, где возникает дефицит мощности, производятся отключения выключателей, обеспечивающие отделение определенного сетевого района от источников питания данной части системы.

Связь сетевого района с той частью системы, где не возникает дефицит мощности, при этом разомкнута выключателем транзитной линии. Восстановление питания нагрузки этого выделенного района производится после АПВ линии транзитной связи, причем для исключения возможности несинхронного включения (в случае, если автоматическое выделение района по каким-либо причинам не происходит) целесообразно сначала производить АПВ выключателя линии со стороны выделенного района с контролем отсутствия напряжения на шинах, а затем АПВ выключателя на другом конце линии с контролем отсутствия напряжения на линии.

Выделение указанного сетевого района должно производиться с таким расчетом, чтобы в случае устойчивого повреждения на линии транзитной связи обесточенной оказалась такая нагрузка, которая все равно должна быть отключена для обеспечения нормальной работы в той части системы, где возникает дефицит мощности. Восстановление связей разделившихся частей системы производится в дальнейшем путем ручной или автоматической синхронизации [1].

Несинхронное АПВ (НАПВ) является наиболее простым способом, допускающим включение частей энергосистемы независимо от разности частот и напряжений. Схема НАПВ выполняется без каких либо блокировок. Для предотвращения включения на устойчивое КЗ обеих концов ЛЭП, а также для обеспечения при НАПВ правильной работы РЗ, АПВ с одного конца ЛЭП выполняется с контролем напряжения на линии. Включение ЛЭП при успешном НАПВ сопровождается сравнительно большими толчками тока и активной мощности, а также более или менее длительными качаниями.

В соответствии с руководящими указаниями допустимость НАПВ определяется максимально допустимым броском тока при

несимметричном включении. Например для турбогенератора серии ТВВ и ТВФ  $I_{нс} / I_{ном} < 3$ , а для турбогенератора с косвенным охлаждением обмоток допустимость проведения НАПВ, определяется из соотношения

$$I_{нс} / I_{ном} < 0,625 / x''_d$$

где  $I_{нс}$  – бросок тока при несинхронном включении, А;

$I_{ном}$  – номинальный ток, А;

$x''_d$  – эквивалентное сопротивление схемы замещения энергосистемы с учетом сверхпереходного сопротивления генератора, Ом.

В указанных условиях желательно иметь возможно меньшую бестоковую паузу при АПВ, и поэтому наилучшим решением является применение быстродействующего АПВ (БАПВ), для осуществления которого требуется наличие быстродействующей релейной защиты и выключателей. В России БАПВ применяется только на ЛЭП, оборудованных воздушными выключателями, которые обеспечивают необходимое быстродействие. Для того чтобы БАПВ было успешным время АПВ  $t_{апв}$ , с, должно удовлетворять следующим условиям:

$$t_{апв} > t_{\delta} + t_{зан}$$

$$t_{апв} = t_{защ2} - t_{защ1} + t_{отк2} - t_{отк1} + t_{\delta} - t_{вкл1} + t_{зан},$$

где  $t_{\delta}$  - время деионизации, составляющее 0,1-0,3с;

$t_{защ1}$ ,  $t_{отк1}$ ,  $t_{вкл1}$  – наименьшая выдержка времени РЗ, времена отключения и включения на своем конце ЛЭП (индекс 1), на котором выбирается выдержка времени АПВ, с;

$t_{отк2}$ ,  $t_{вкл2}$  – выдержка времени второй ступени РЗ и время отключения выключателя на противоположном конце ЛЭП (индекс 2), с;

$t_{зан}$  – запас времени, учитывающий погрешность реле времени устройства АПВ и РЗ, отличия времен действия выключателей от расчетных и т.д., принимается равным 0,5-0,7 с.

Поскольку время включения составляет 0,2-0,3 с, деионизация среды будет обеспечена при выполнении БАПВ без выдерж-

ки или с небольшой выдержкой времени (0,1-0,2 с).

Успешное БАПВ возможно лишь в том случае, если КЗ отключается с обоих концов ЛЭП за 0,1-0,2 с. Чем медленнее отключается повреждение, тем на больший угол успевают разойтись ЭДС. Поэтому БАПВ применяется только в тех случаях, когда ЛЭП оснащена быстродействующей РЗ, обеспечивающей отключение повреждения без выдержки времени с обоих концов. Достоинствами БАПВ является простота схемы и высокая эффективность действия, что обеспечивает восстановление параллельной работы без длительных качаний и с меньшими толчками тока, чем при НАПВ.

Время бестоковой паузы при БАПВ, допустимое по условию сохранения устойчивости параллельной работы, определяется расчетом устойчивости. Ориентировочно оно находится из следующих соображений: за время КЗ и отключенного состояния транзитной связи векторы ЭДС не должны разойтись на угол, больший угла  $\delta_{пр}$ , при котором возможно повторное включение без асинхронного хода.

Угол  $\delta_{пр}$  принимается равным 60-70°. Если предположить, что в предаварийном режиме угол  $\delta_{ном} = 20^\circ$ , то приращение угла за время БАПВ  $\delta_{12}$ , град, будет равно

$$\delta_{12} = \delta_{пр} - \delta_{ном} = 40-50^\circ$$

Преимущества НАПВ определяется тем, что оно, обеспечивая повторное включение линии с относительно небольшой выдержкой времени, позволяет достаточно быстро восстановить параллельную работу в системе. Отметим, что применение АПВ с улавливание синхронизма (АПВ УС) в ряде случаев является не эффективным, так как в следствии быстрого расхождения по фазе ЭДС разделившихся частей системы устройства АПВ УС либо не разрешают повторное включение, либо разрешают его через значительный промежуток времени после отключения зна-

чительной мощности устройствами автоматической частотной разгрузки (АЧР) [2].

На линиях с двухсторонним питанием, имеющих две-три шунтирующих связи применяются устройства АПВ ОС, рис. 1. Необходимость проверки допустимости АПВ в этих случаях обусловлена тем, что при наложении аварий в ремонтном режиме такие линии могут оказаться в режиме одиночного транзита, после размыкания которого возможно нарушение синхронной работы разделившихся частей системы. При этом на устройство АПВ ОС не возлагается задача обеспечения АПВ одиночной линии в указанных условиях; они должны производить АПВ отключившейся линии лишь при нахождении в работе других, шунтирующих ее связей, а содержащиеся в них органы контроля – предотвращать недопустимое включение на несинхронное напряжение в указанных выше чрезвычайно редких случаях полного разделения частей системы.

Ранее схемы устройств АПВ для указанных случаев выполнялись таким образом, что пуск устройства производился независимо от наличия условий синхронизма, а проверка наличия этих условий производилась в момент посылки импульса на включение. Практика показала, что такие решения оказались неудачными, так как при отключениях линий с двусторонним питанием даже при наличии нескольких шунтирующих связей иногда воз-

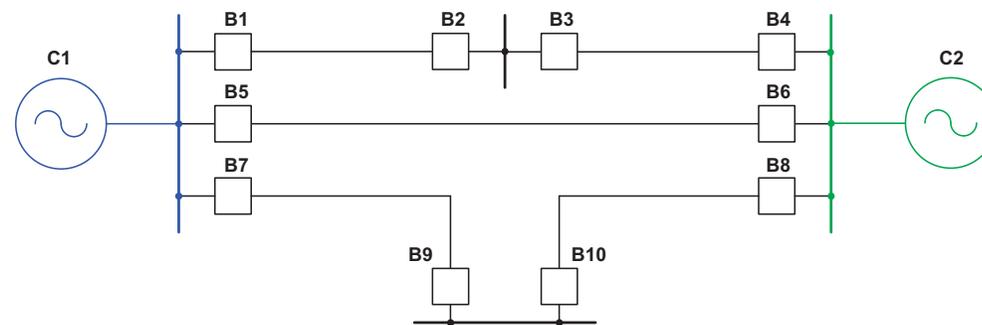


Рис. 1. Схема ЛЭП с шунтирующими связями

никали весьма непродолжительные качания, при которых органы контроля синхронизма запрещали посылку импульса АПВ, и поэтому вполне допустимое после прекращения качаний повторное включение не производилось [1].

В связи со сказанным в дальнейшем принцип выполнения указанных устройств АПВ был изменен путем включения органа контроля синхронизма в цепь пуска устройства. Благодаря этому пуск и работа устройства АПВ оказываются возможными либо в условиях синхронизма встречных напряжений, либо в условиях, близких к синхронизму, когда реле контроля синхронизма обеспечивает непрерывность работы реле времени устройства АПВ в течение установленной на последнем выдержки времени. Работа устройства контроля синхронизма происходит следующим образом, рис. 2. Если частота вращения векторов на линии и шинах отличны, т.е. имеют биение, то в этом случае работает реле времени, в зоне между точками 1 и 2 при это в случае больших скольжениях, т. е. при малой продолжительности замыкания контакта реле контроля синхронизма, устройство АПВ будет многократно пускаться и возвращаться, но так как каждый раз реле времени будет работать в течение времени, меньшего, чем необходимо для замыкания его контакта, то АПВ происходить не будет. Оно будет произведено лишь после того, как скольжение достигнет до-

статочно малой величины, при которой срабатывание реле времени окажется возможным. Благодаря этому при таком выполнении схемы, в отличие от практиковавшегося ранее включения органов контроля в выходную цепь АПВ, обеспечивается контроль величины скольжения и «ожидание» условий синхронизма. Такие устройства достаточно просты и позволяют обеспечить АПВ линии при небольших скольжениях порядка 0,2-0,4%, что обычно имеет место при наличии шунтирующих связей.

Устройства АПВ ОС обоих концов линии с двухсторонним питанием обычно имеют одинаковую схему, предусматривающую наличие в устройстве как органа контроля отсутствия напряжения на линии, так и органа контроля синхронизма напряжений на линии и шинах. Путем соответствующих переключений в схеме режимы работы этих устройств устанавливаются таким образом, чтобы АПВ выключателя на одном из концов линии производилось при отсутствии на ней напряжения, а на другом – при наличии напряжения, синхронного по отношению к напряжению на шинах, или допустимой величине скольжения. При этом условия работы выключателей на разных концах линии оказываются различными: один из них производит большее количество отключений тока короткого замыкания, чем другой. Это объясняется тем, что выключатель того конца линии, где АПВ производится с проверкой отсутствия напряжения на линии, всегда включается первым и при устойчивом повреждении вторично отключается. АПВ выключателя другого конца линии в этих случаях вообще не производятся. Для обеспечения одинаковых условий работы выключателей персоналом производятся соответствующие переключения в устройствах АПВ с таким расчетом, чтобы АПВ с проверкой отсутствия напряжения на линии не производилось все время одним выключателем [2].

На одиночных и параллельных транзитных линиях, не имеющих шунтирующих связей, используются устройства АПВ УС, рис. 3 при невозможности применения НАПВ или БАПВ. Они используются

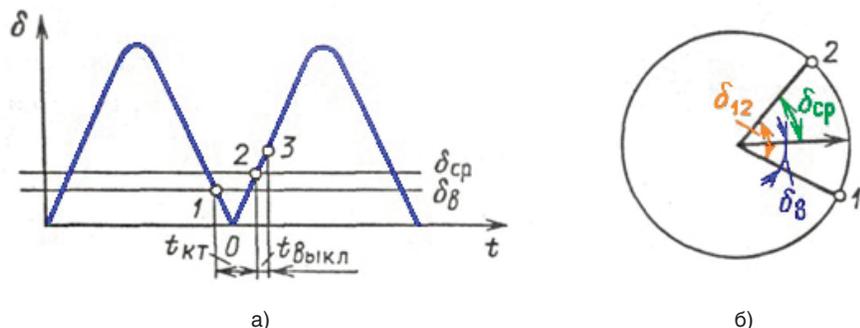


Рис. 2. Пояснение работы устройства АПВ с ожиданием синхронизма

а) изменение угла между векторами ЭДС при несинхронном режиме;

б) область работы реле времени устройства АПВ (область ограничения углом  $\delta_{12}$ ).

также на линиях, имеющих шунтирующие связи, в случаях когда последние могут быть длительно отключены или их пропускная способность недостаточна для обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов в связываемых ими частях системы.

Устройство АПВ УС представляет собой устройство АПВ, дополненное органами, контролирующими угловую скорость относительного вращения векторов разделившихся частей системы и обеспечивающими посылку импульса АПВ в определенном диапазоне разности частот с опережением момента совпадения фаз напряжений.

Устройства АПВ УС обеспечивают возможность осуществления АПВ при значительно больших скольжениях, чем рассмотренное выше устройство АПВ ОС, и могут применяться, если после отключения КЗ в режиме максимальной нагрузки величина скольжения не превышает 3,5-4%. При больших скольжениях увеличение полного времени включения выключателя, возможное вследствие понижения напряжения оперативного тока в цепи питания привода, понижения температуры и т. п., может приводить к значительному

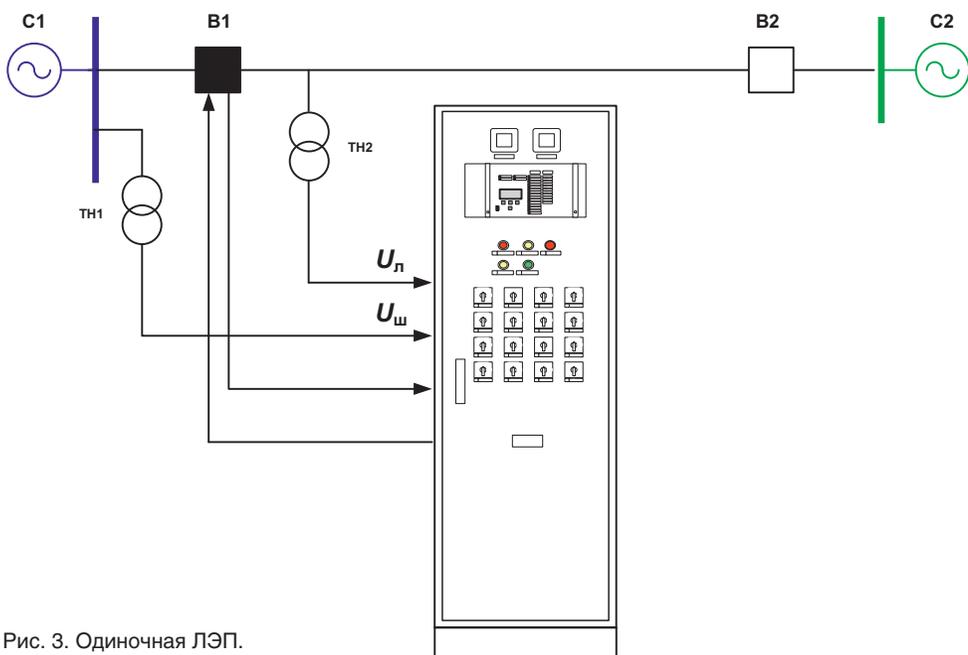


Рис. 3. Одиночная ЛЭП.

увеличению угла между векторами напряжений в момент включения выключателя. Уже при скольжениях, равных 4%, увеличении  $t_b$  на 10% может увеличить  $\delta_b$  на 25-30°.

При отключении сильно нагруженных транзитных линий скольжение может превысить указанные выше предельные величины. В этих случаях повторное включение линии устройством АПВ УС окажется возможным только после того, как в части системы, где возникает дефицит мощности, будут автоматически введены резервные гидрогенераторы, а устройства АЧР отключат часть нагрузки.

В отличие от НАПВ и БАПВ повторное включение транзитных линий устройствами АПВ УС происходит без значительных толчков уравнительных токов и без последующего асинхронного хода. Поэтому при осуществлении АПВ УС мероприятия по обеспечению правильности действия релейной защиты ограничиваются обычно лишь отстройкой быстродействующих защит нулевой и обратной последовательностей от разновременности включений фаз выключателя. При осуществлении АПВ с улавливанием синхронизма, как и при рассмотренном выше способе АПВ с «ожиданием» синхронизма, повторное включение выключателя на одном конце линии производится при отсутствии на ней напряжения, а на другом при условии, что оно разрешается органами улавливания синхронизма. При этом схемы устройств АПВ обоих концов линии выполняются одинаковыми, но обеспечивается возможность изменения режимов их работы по усмотрению персонала.

В эксплуатации применяется несколько модификаций устройств АПВ УС, причем наибольшее распространение получили устройства, в которых в качестве органа, контролирующего допустимость АПВ по условиям синхронизма, используется релейное устройство, действующее на принципе синхронизатора с постоянным углом опережения. Для микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматизации (МПРЗА) это в первую очередь связано с простотой алгоритма, что позволя-

ет использовать небольшие вычислительные мощности.

Следует иметь в виду, что в соответствии с принципом действия синхронизатора с постоянным углом опережения устройства АПВ такого типа не могут действовать при синхронизме напряжений на линии и шинах; они обеспечивают посылку импульса на повторное включение лишь при наличии скольжения, не превышающего определенной величины [1]. В случае применения устройства АПВ УС на электростанциях целесообразно применять обратную связь для десинхронизации системы.

При применении устройств с улавливанием синхронизма на подстанциях, возможность такого взаимодействия отсутствует. Наиболее подходящим вариантом, в этом случае, будет взаимодействие устройств АПВ ОС и АПВ УС, рис. 4. Если после отключения сохранился синхронизм, или присутствует постоянное небольшое скольжение устройство должно работать по логике с ожиданием синхронизма. В остальных случаях посылку импульса на повторное включение должно обеспечиваться устройством улавливания синхронизма. Использование такого решения позволяет исключить недостаток алгоритма синхронизатора с постоянным углом опережения.

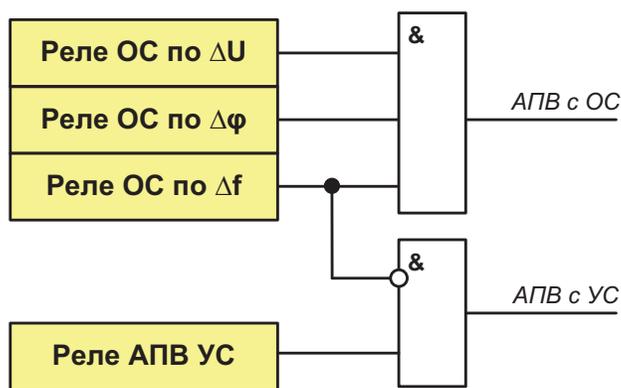


Рис. 4. Взаимодействие АПВ ОС и АПВ УС.

Литература:

1. Богорад А.М., Назаров Ю.Г. Автоматическое повторное включение в энергосистемах. – М.: Энергия, 1969. – 336 с.
2. Овчаренко Н.И., Сушко В.А. Автоматика электроэнергетических систем. – Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 187 с.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

## Сведения об авторах

### Кошельков Иван Александрович



Инженер 2 категории. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова» в 2010 году. В 2010 году получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Автор 6 научных публикаций в области противоаварийной автоматики и релейной защиты, микропроцессорной техники.

### Дони Николай Анатольевич



Директор по науке - заведующий отделом перспективных разработок. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.

### Петров Андрей Анатольевич



Заместитель заведующего отделом защит подстанционного оборудования. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова» в 2004 году. В 2004 году получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Автор 5 научных публикаций в области релейной защиты и микропроцессорной техники.

УДК 621.316.925.1

Воробьев И.А., Доронин А.В., Лебедев А.В.  
**РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ РОТОРА ОТ ЗАМЫКАНИЯ  
НА ЗЕМЛЮ ПРИ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРА С  
НЕСКОЛЬКИМИ СИСТЕМАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

**Аннотация:** в статье описаны различные способы подключения защиты ротора от замыкания на землю. Проанализированы их достоинства и недостатки. Описан комплекс устройств защиты ротора от замыкания на землю, реализованный на базе серии шкафов ШЭ11 IX производства ООО НПП «ЭКРА».

**Ключевые слова:** генератор, система возбуждения, защита ротора от замыканий на землю, ЭКРА.

I.A. Vorobiov, A.V. Doronin, A.V. Lebedev

**REALIZATION OF ROTOR EARTH FAULT PROTECTION WHEN A GENERATOR OPERATES WITH SEVERAL EXCITATION SYSTEMS**

Abstract: In the article different ways of connection of rotor earth fault protection are described. Their advantages and disadvantages are analyzed. The complex of devices of rotor earth fault protection realized on the basis of cubicles ШЭ11 IX series developed in EKRA Enterprise is described.

Keywords: generator, excitation system, rotor earth fault protection, EKRA.

Современные турбоагрегаты (ТА) имеют не одну, а как минимум две, а то и три системы возбуждения (СВ), которые необходимо защищать от повреждения изоляции относительно контура заземления.

На генераторах большой и, по возможности, на генераторах средней и малой мощности устанавливаются устройства защиты от замыкания на землю в одной точке цепи возбуждения с наложением переменного или постоянного тока. Обычно эти устройства одним из полюсов подключают к цепи возбуждения, другим – к релейной щетке (рис. 1) [1].

При таком подключении защиты ротора (ЗР) будет обеспечиваться контроль изоляции обмотки возбуждения через скользящий контакт

релейной щетки (РЩ) с валом и внешней цепи системы возбуждения по отношению к ротору (изоляция цепи возбуждения по отношению к контуру заземления) через скользящий контакт релейной щетки с валом и вала с заземляющей щеткой (ЗЩ). При хорошем контакте щеток с валом ТА обеспечивается контроль изоляции всей цепи возбуждения. Если нарушается контакт ЗЩ с валом, то устройство обеспечивает контроль изоляции только обмотки возбуждения и не контролирует изоляцию внешней цепи возбуждения, а нарушение контакта РЩ с валом приводит к полному отказу защиты.

В настоящее время для защиты цепей возбуждения от замыкания в одной точке широко применяются устройства, работающие на различных принципах наложения в цепь возбуждения напряжения:

- пониженной частоты; [2, 3]
- постоянного напряжения; [2]
- прямоугольных импульсов низкой частоты. [4]

Однако во всех вышеупомянутых принципах построения защит необходима компенсация емкостной составляющей контролируемого тока, обусловленной собственной емкостью цепи системы возбуждения.

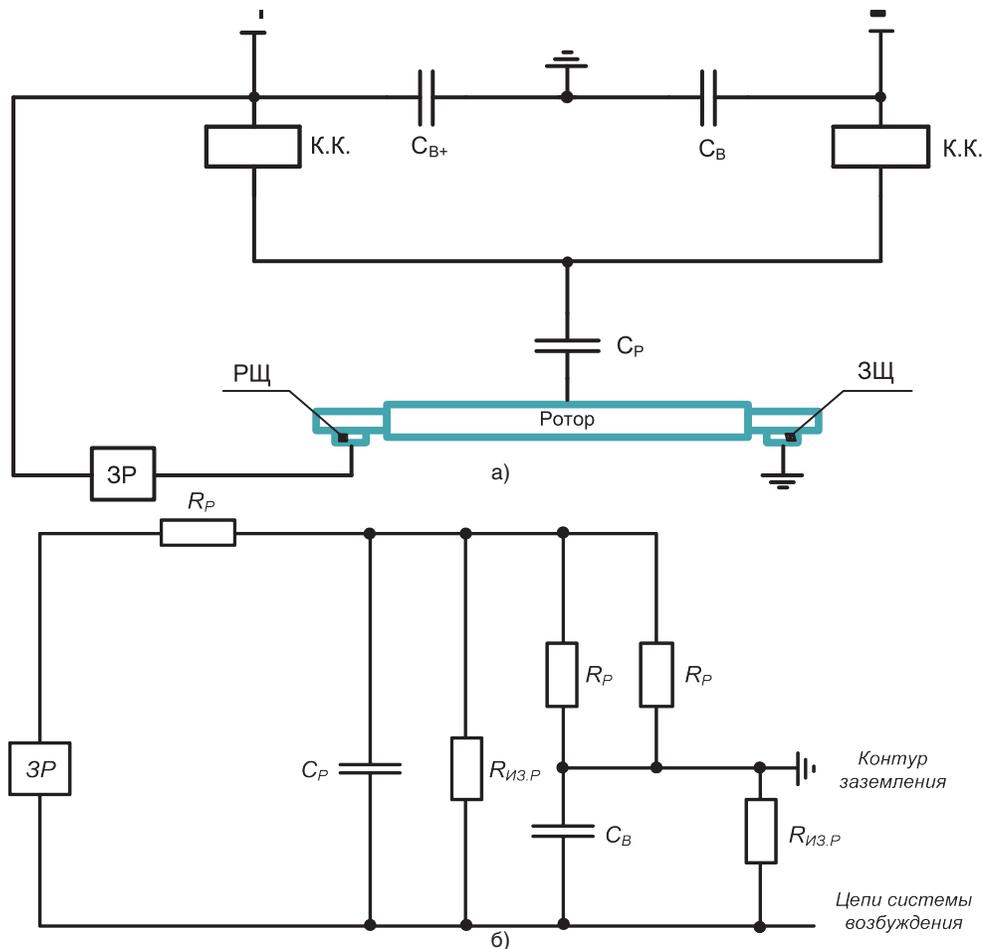
Современные системы возбуждения используют не одну, а несколько систем возбуждения, переключение между которыми может быть организовано в автоматическом режиме. При оперативном переключении между системами возбуждения возникает скачкообразное изменение величины емкости СВ относительно контура заземления станции, что может привести к ложному срабатыванию защиты.

В связи с этим фактом существует необходимость в устройстве, позволяющем контролировать сопротивление изоляции цепи возбуждения относительно земли при оперативных переключениях между системами возбуждения.

Для решения данной задачи предлагается комплекс

устройств, совместная работа которых представлена на рис. 1.

Устройство №1 представляет собой источник напряжения не промышленной частоты (17Гц). Генерируемое напряжение накладывается в цепь системы возбуждения и в схему компенсации через мостовую схему на низкоомных резисторах R1, R2. Компенсация



где  $C_{B+}$  – емкость положительного полюса цепей системы возбуждения по отношению к контуру заземления станции;  $C_B$  – емкость отрицательного полюса цепей системы возбуждения по отношению к контуру заземления станции;  $C_P$  – емкость цепей ротора по отношению «телу» ротора; ЗР – защита ротора от замыкания на землю в одной точке; РЩ – релейная щетка, обеспечивающая скользящий контакт ЗР с валом ротора; ЗЩ – заземляющая щетка, обеспечивающая контакт вала ротора с контуром заземления станции; К.К – контактные кольца.

Рис. 1. Схема подключения устройств защит ротора к цепи системы возбуждения (а) и ее схема замещения (б)

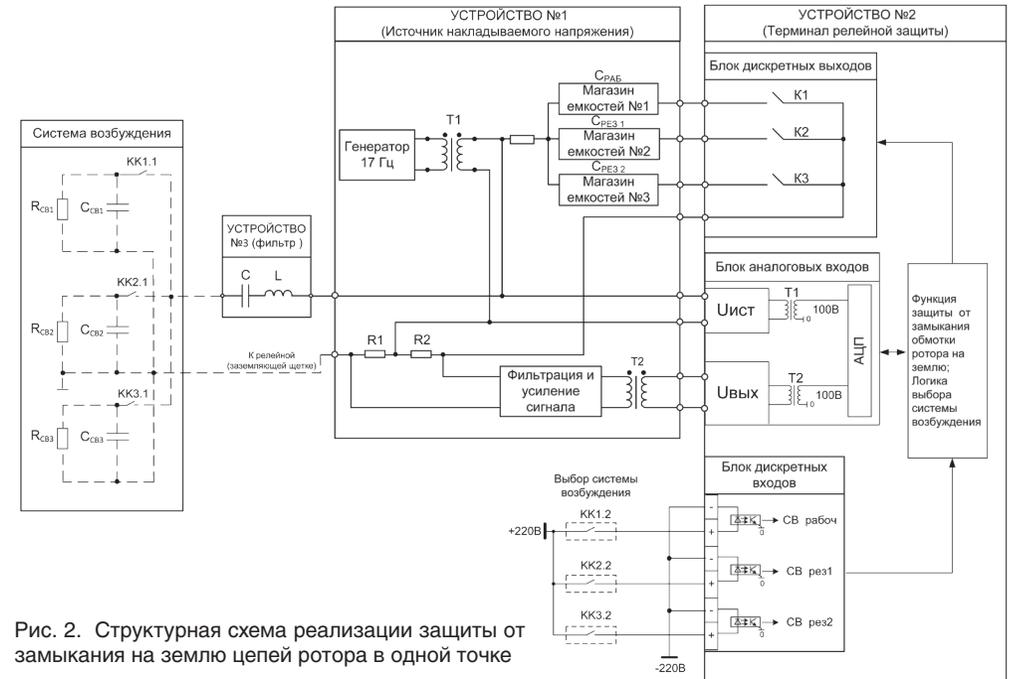


Рис. 2. Структурная схема реализации защиты от замыкания на землю цепей ротора в одной точке

емкости системы возбуждения относительно «земли» достигается с помощью настройки эквивалентной емкости с помощью трех магазинов емкостей. Устройство №1 защищено от возможного перенапряжения в цепях системы возбуждения с помощью устройств №3.

При нормальном режиме работы системы возбуждения схема сбалансирована:  $C_{РАБ} = C_{СВ1}$ ,  $R_{ИЗОЛ1} \rightarrow \infty$ ;  $C_{РЕЗ1} = C_{СВ2}$ ,  $R_{ИЗОЛ2} \rightarrow \infty$ ;  $C_{РЕЗ2} = C_{СВ3}$ ,  $R_{ИЗОЛ3} \rightarrow \infty$ . Следовательно, падение напряжения на резисторах  $U(R_1, R_2) \rightarrow 0$  (баланс токов через резисторы). Защита не сработала. При изменении в цепях ротора баланс схемы нарушается ( $U(R_1, R_2) \gg 0$ ). Если происходит снижение изоляции цепей системы возбуждения напряжение на резисторах  $U(R_1, R_2)$  увеличится, однако угол между векторами напряжения на мостовой схеме и на источнике не будет отличаться от угла между векторами напряжения при нормальном режиме работы. В случае же отскока релейной щетки от вала ротора изменение величины напряжения на мостовой схеме не произойдет, а угол между векторами напряжения на резисторах и на источнике изменится.

Следовательно, применяя автоматическое переключение между магазинами емкостей, можно реализовать защиту, работающую с несколькими системами возбуждения.

Комплекс устройств, представленный на рис. 2, реализован на базе серии шкафов ШЭ111Х производства ООО НПП «ЭКРА».

Литература:

1. Евдокимов С.А., Левиуш А.И., Алексеев В.Г., Бородавкин А.В. Влияние нарушения заземления вала на работу защит цепей возбуждения и меры по повышению надежности их работы // «Релейщик» №1, 12.2008, стр. 26-31.
2. Техническое описание ЭКРА.656116.166ТО версия 4.10 (пункт 4.18).
3. Э.М. Шнейерсон. Цифровая релейная защита. 2007. Стр. 454-456

### Сведения об авторах



**Доронин Александр Викторович**

Дата рождения: 07.02.1976 г. В 1998 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова (ЧГУ) по специальности «Автоматизация энергосистем». Заведующий сектором проектирования отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



**Лебедев Александр Владиславович**

Дата рождения 27.07.1981. В 2004 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Магистр техники и технологии. Руководитель группы отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА»



**Воробьев Илья Алексеевич**

Дата рождения 21.01.1986 г. В 2009 г. окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электрических и электронных аппаратов», специализация «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем». Магистр техники и технологии. Инженер отдела защит низкого напряжения ООО НПП «ЭКРА».

УДК 621.316.925

Гущин Г.Д., Несмеянов Д.А., Шевцов В.М.

## ВАРИАНТ НАДЕЖНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН КРУ СН-6 КВ ЧЕБОКСАРСКОЙ ГЭС

**Аннотация:** предложена схема защиты собственных нужд переменного напряжения 6 кВ, отвечающая современным требованиям; не содержит оптических датчиков для защиты от дуговых замыканий.

**Ключевые слова:** релейная защита, КРУ, собственные нужды, защита шин, микропроцессорные устройства РЗА.

Gushin G.D., Nesmeyanov D.A., Shevtsov V.M.

### RELIABLE AUXILIARY NEEDS BUSBAR PROTECTION OF CHEBOKSARY HYDROELECTRIC POWER STATION

Abstract: corresponding to the modern requirement for 6 kV auxiliary needs scheme of protection is proposed. This scheme does not contain optical sensors for arc faults protection system.

Keywords: relay protection, switchgear, auxiliary, bus bar protection, microprocessor relay protection devices.

Реализация программы технического перевооружения ГЭС, наряду с заменой выработавшего свой ресурс различного силового, в том числе высоковольтного оборудования, предполагает модернизацию и устройств РЗА. Это должно обеспечить повышение надежности, безопасности и эффективности их функционирования в соответствии с новыми современными более жесткими требованиями [1]. В этой связи одной из актуальных задач применения микропроцессорных релейных защит на ЧеГЭС является разработка системы защиты шин КРУ собственных нужд 6 кВ (СН-6 кВ).

Как известно [2], собственные нужды (СН) электростанции – это комплекс важного вспомогательного электрического оборудования электростанции, обеспечивающего бесперебойную работу

её основных агрегатов (паровых котлов, турбогенераторов, гидротурбин или ядерных реакторов). Грамотная организация СН повышает живучесть станции, а также сохранность оборудования и безопасность персонала даже в крайне тяжелых аварийных режимах.

Снабжение электроэнергией СН должно производиться несколькими независимыми источниками энергии [3]. Распределение электроэнергии происходит в комплектных распределительных устройствах (КРУ) собственных нужд (СН).

Короткое замыкание (КЗ), сопровождаемое электрической дугой, – это опаснейшая из аварийных ситуаций, имеющих место в КРУ электрических подстанций, прежде всего, по своим разрушающим последствиям (см. рис. 1).



Рис. 1. Последствия дугового замыкания в ячейке КРУ-10кВ:  
а) масляные выключатели после дугового замыкания; б) релейный отсек КРУ.

Температура горения дуги определяется мощностью и эквивалентным сопротивлением энергосистемы, конструкцией КРУ и может достигать 20000 °С. Несрабатывание защит КРУ, в данном режиме, приводит к необратимым последствиям – выходу из строя одной или нескольких ячеек КРУ. Если данная ситуация возникнет в КРУ СН электростанции, это может привести к потере питания СН, или полной остановке технологического процесса на ЭС.

Поэтому к комплексу защит СН ЭС предъявляются повышенные требования к чувствительности, быстродействию и надежности.

Рассмотрим проблему повышения надежности комплекса защит КРУ СН 6/10кВ на примере Чебоксарской ГЭС. Как уже упоминалось ранее, наиболее опасным повреждением для СН ЭС является дуговое замыкание в ячейке КРУ. На сегодняшний день в качестве защиты от дуговых замыканий широкое применение в эксплуатации получили дуговые защиты, реагирующие на физические параметры дуги. Наиболее характерными защитами являются:

1. Клапанная дуговая защита (как правило, устанавливается заводом-изготовителем ячеек). Главными недостатками данной защиты являются: низкая чувствительность, надежность, и недостаточное быстродействие [4]. К недостаткам можно отнести невозможность применения данной защиты в ячейках КРУ старого типа из-за конструктивных особенностей. Это особенно актуально для вариантов реконструкции КРУ, выполняемых без замены самих ячеек.
2. Фототиристорная дуговая защита (получила распространение в южных энергосистемах страны). Эта защита обладает серьезными недостатками: ограниченным обзором пространства ячейки; присутствием в зоне горения дуги активных компонентов защиты; сложность организации контроля исправности фототиристоров; возможность ложной работы при попадании прямого солнечного света, света от ламп освещения или электросварки [5].
3. Дуговая защита на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД). По мнению специалистов наиболее надежная защита от дуговых замыканий. Однако она также имеет недостатки: необходимость контроля волоконно-оптических датчиков; имея широкий угол обзора ВОД, защита может сработать ложно при дуговом замыкании в соседней ячейке [5].

## Примечание:

1. Наиболее распространённые в настоящее время оптические защиты, основанные на контроле светового потока, обладают рядом существенных недостатков. Подавляющее большинство коротких замыканий имеют своей первопричиной замыкания на землю (ОЗЗ). Защиты от ОЗЗ согласно нормативам могут действовать как на отключение, так и на сигнал. Наиболее распространённое повреждение в ячейке КРУ это ОЗЗ в разделке кабеля 6-10 кВ кабельного отсека. Данное повреждение сопровождается, согласно терминологии ОРГРЭС, «закрытой заземляющей дугой», которая вызывает быстрое задымление кабельного отсека ячейки. При развитии повреждение переходит в междуфазное КЗ. Надёжная работа оптической защиты в подобных условиях вызывает большое сомнение.
2. В эксплуатации были зафиксированы случаи загорания силовых контактов выключателя 6,10 кВ ячейки в результате ошибок персонала при вкатывании тележки выключателя. В данном режиме дуга с током нагрузки возникает в замкнутом пространстве между недозамкнувшимися контактами выключателя с достаточно быстрым (несколько секунд) задымлением ячейки КРУ. Создаются весьма тяжёлые условия при работе дуговой защиты при последующем коротком замыкании.
3. Следует отметить усложнённую ремонтоспособность ячеек КРУ, укомплектованную устройствами оптической дуговой защиты, так как имеется возможность обрыва оптических цепей при проведении ремонтных работ в отсеках ячеек КРУ.

Исторически сложилась следующая ситуация – для защиты от дуговых замыканий использовались и используются защиты, реагирующие на неэлектрические параметры дуги. Однако, возможно также применение релейных защит с контролем электрических ве-

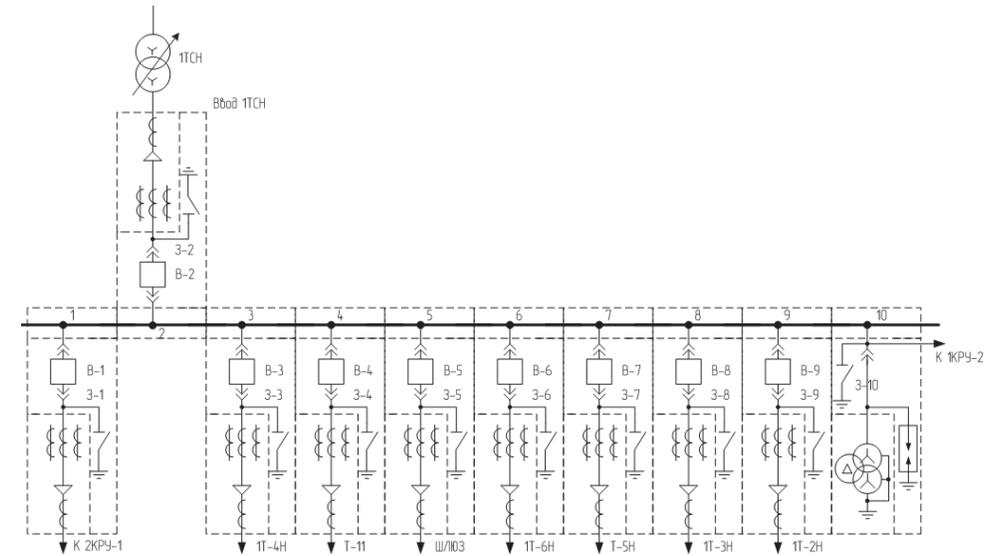


Рис. 2. Распределительное устройство КРУ СН Чебоксарской ГЭС (1КРУ-1)

личин для локализации дуговых замыканий. В качестве такой защиты можно рекомендовать токовую дифференциальную защиту шин. Заметим сразу, что её применение ограничено в первую очередь высокой стоимостью современного микропроцессорного комплекса с ДЗШ.

В [6] рассматривается возможность реализации защиты шин собственных нужд с использованием терминалов ДЗШ, при высоких значениях погрешностей измерительных трансформаторов тока (50% и более), с дополнительной реализацией блокировок от РНМ.

В нашем случае, согласно предварительным расчетам, погрешность измерительных трансформаторов тока, с учетом перевооружения КРУ СН, не будет превышать 10-15% [7], следовательно, нет необходимости применять дополнительные РНМ для блокировки работы логики ДЗШ.

Рассмотрим более подробно вариант применения двух защит: дуговой на основе ВОД и дифференциальной защиты шин на примере модернизации комплекса РЗА, а именно КРУ СН – 1КРУ Чебоксарской ГЭС (см. рис. 2).

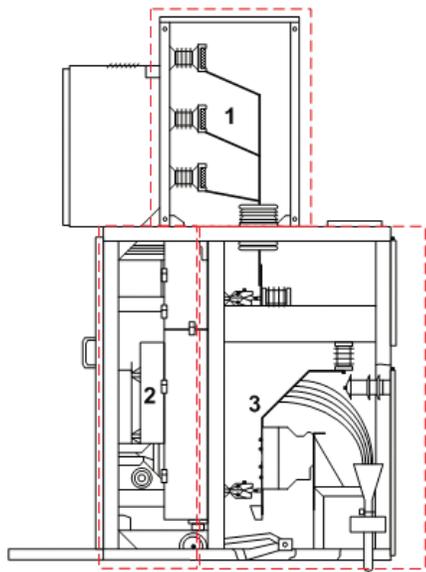


Рис. 3. Типовая конструкция ячейки КРУ

Конструктивно пространство типовой ячейки КРУ упрощенно делится на 3 отсека (см. рис. 3, соответственно 1,2,3): сборных шин (1), коммутационных аппаратов (2), кабельной сборки и измерительных трансформаторов тока (3).

Как показывает опыт эксплуатации, наиболее опасным местом возникновения дугowego замыкания является замыкание в отсеке 3. В данном случае замыкание, как правило, распространяется на все остальные отсеки, и

приводит часто к выходу из строя и внешнего кабеля.

1) Рассмотрим режим дугowego замыкания в отсеке сборных шин, при этом необходимо действие защиты на отключение выключателя ввода, а так же отключение межсекционных связей. В данном аварийном режиме обе защиты сработают с достаточным быстродействием (до 40 мс) и селективно отключат повреждение в любой ячейке КРУ.

2) При дуговом замыкании в отсеке коммутационных аппаратов, также необходимо отключение всей секции (весьма вероятно повреждение высоковольтного выключателя ячейки). В общем случае защиты отработают аналогично первому случаю, однако, при дуговом замыкании в отсеке ячейки ввода (см. рисунок 4) отключение секции от ДЗШ будет недостаточным для устранения повреждения (остается подпитка со стороны ТСН). В аварийном режиме, для устранения этого «сложного» повреждения применяется УРОВ, действующий на отключение генераторных выключателей, а также на отключение выключателей 500кВ блочного трансформатора Т1. Стоит отметить,

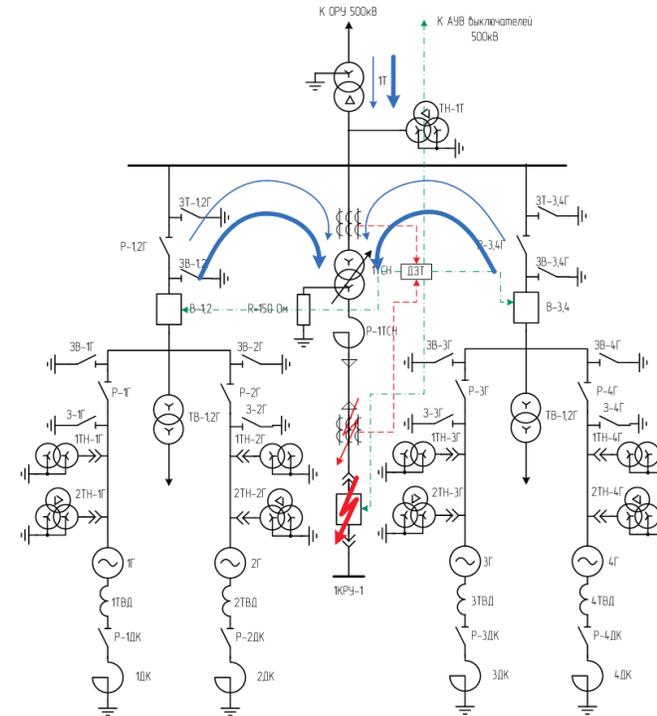


Рис. 4. Пояснение к анализу поведения защит при замыкании в отсеке выключателя ячейки ввода (показано утолщенными линиями) и при повреждении в отсеке измерительных ТТ ячейки ввода (показано тонкими линиями)

что к аналогичным последствиям приводит действие дуговой защиты с датчиками типа ВОД. Выдержка времени УРОВ, согласно расчетам, составляет порядка 200-300 мс, что позволяет характеризовать ее как быстродействующую защиту.

3) Аварийный режим с дуговым замыканием в отсеке измерительных трансформаторов тока и кабельной разделки следует рассмотреть в наиболее критичном варианте – дуговое замыкание с повреждением измерительного трансформатора тока. При данном виде повреждения происходит потеря информации от измерительного ТТ (в защите не протекают вторичные токи ТТ). В данном случае ДЗШ действует не селективно и отключает секцию. Неселективное действие, согласно ПУЭ, допустимо, т.к. потребители СН имеют обязательное резервирование. Дуговая защита с использованием ВОД в данном случае отработает селективно, и отключит поврежденный выключатель. К «особым»

ячейкам стоит в данном случае отнести ячейку ввода от ТСН1. Здесь дуговое замыкание в отсеке измерительных ТТ будет устранено дифференциальной защитой трансформатора собственных нужд (см. рис. 4).

Таким образом, с технической точки зрения оба типа защит удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям по чувствительности, селективности и быстродействию. Однако следует принимать во внимание следующий факт, что современные терминалы ДЗШ (например, терминал ЭКРА 214 14) помимо самой функции ДЗШ также могут дополнительно содержать функции

индивидуальных комплектов УРОВ, МТЗ и ТО присоединений [8]. Тем самым, терминал ДЗШ дополнительно резервирует защиты терминалов, установленных в ячейках, что в целом увеличивает надёжность системы РЗА СН.



Рис. 5. Общий вид терминала ЭКРА 214 14

Применение развитой схемы электрических защит ячеек КРУ с комплектацией микропроцессорными терминалами ДЗШ и дублированием защит отходящих ячеек КРУ позволяет существенно увеличить надёжность эксплуатации, путём быстрого отключения коротких замыканий любого вида внутри всех ячеек КРУ. При этом важным фактором является быстродействие комплекса РЗА для устранения коротких замыканий во всей сети СН-6 кВ, что никаким образом не может быть достигнуто применением оптических защит. При всём этом сохраняется хорошая ремонтоспособность самих ячеек КРУ. Отпадает также необходимость применения в КРУ логической защиты шин (ЛЗШ), предписанной к установке требованиями [3], так как защита ДЗШ полностью дублирует функции ЛЗШ.

Важным элементом увеличения надёжности эксплуатации ячеек КРУ и всей сети СН 6-10 кВ является применение защиты от замыканий на землю с действием на отключение. При этом резко снижается возможная вероятность появления разного рода дуговых КЗ.

В связи с тем, что оборудование СН ЧеГЭС морально устарело, и из-за необходимости ограничения токов КЗ в существующей схеме СН-6 кВ приведем сравнительный анализ стоимости двух вариантов комплексных решений:

1 Вариант: установка ячеек КРУ, комплекса защит ячеек КРУ, а так же дуговой защиты на ВОД в качестве защиты от дуговых замыканий в ячейках КРУ.

2 Вариант: установка ячеек КРУ, комплекса защит ячеек КРУ, а так же шкафа дифференциальной защиты в качестве защиты от дуговых замыканий в ячейках КРУ.

Ориентировочно стоимость данных вариантов приведена на рис. 6. Следует принять во внимание, что различия в стоимости комплексного решения между вариантами не превышает 5%. В расчетах не учитывались затраты на приобретения оборудова-

### Капитальные затраты на первооружение КРУ СН



Рис. 6. Различия в стоимости комплексных решений при реконструкции СН Чебоксарской ГЭС.

ния для ограничения токов КЗ (установка токоограничивающих реакторов на стороне НН ТСН) и затраты на перевод СН в режим работы с резистивно-заземленной нейтралью. При учете данных затрат различия в стоимости сокращаются.

### Выводы:

1. Применение дифференциальной защиты шин в качестве защиты от дуговых замыканий возможно, во всех случаях сохраняется селективность и быстрдействие защиты.
2. Действие ДЗШ при любом повреждении аналогично действию дуговой защиты, кроме того сохраняется работоспособность защиты вне зависимости от степени задымления ячеек КРУ.
3. Дополнительно реализуемые функции резервных защит присоединения при применении ДЗШ увеличивают надежность всего комплекса РЗА СН, особенно в части коротких замыканий вне ячеек КРУ.
4. Стоимость единичной поставки шкафа ДЗШ значительно выше стоимости поставки комплекса дуговых защит с ВОД, однако при комплексной поставке оборудования различие не превышает 2-5%.

### Литература:

1. Техническая политика ОАО «РусГидро». Проект.
2. Балтиданов Л. Н., Тарасов В. И., Электрооборудование электрических станций и подстанций, 3 изд., т. 1–2, М. — Л., 1959—60.
3. СТО 17330282.27.140.020-2008 – Системы питания собственных нужд ГЭС. Условия создания. Нормы и требования.
4. Чувствительность устройств дуговой защиты. Учебное пособие по курсу семинара: «Монтаж, пуско-наладочные работы и эксплуатация УДЗ «ОВОД-МД»
5. В.И. Нагай, С.В. Сарры, А.В. Луконин, Д.С. Иванов, И.В. Нагай, И.С. Тишаков - Дуговые защиты КРУ 6-10 кВ с продольно-поперечным включением оптических датчиков.
6. Баханович А.С. Защита шин и резервная защита вводов электростанций. М. Релейщик №4, 2010.
7. Д.А. Несмеянов. Комплекс защит распределительного устройства собственных нужд Чебоксарской ГЭС. Дипломный проект, ЧГУ. Чебоксары, 2011.
8. ЭКРА.656122.006 РЭ – Терминалы серии ЭКРА 200. Руководство по эксплуатации.
9. Отчет о НИР. Техническое обследование режимов заземления нейтрали СН-6 кВ для предотвращения опасных перенапряжений и расчет устройств токоограничения для увеличения термостойкости оборудования с выдачей экспертного заключения, разработки ТЭО выбранного варианта. НПП «ЭКРА». Чебоксары, 2010.

### Сведения об авторах



#### **Шевцов Виктор Митрофанович**

Заместитель технического директора по науке — заведующий техническим отделом. Родился в 1939 г. Окончил энергетический факультет Ново-черкасского политехнического института в 1961 г. Кандидат технических наук, проф. каф. ТОЭ и РЗА ЧГУ, научный руководитель ПНИЛ «Цифровая электротехника», заслуженный изобретатель ЧР. Автор 56 изобретений в области электротехники, противоаварийной автоматики и релейной защиты. Имеет более 100 научных публикаций в области нелинейной электротехники, электроэнергетики и микропроцессорной техники.



#### **Гущин Геннадий Дмитриевич**

ведущий инженер производственно-технической службы Филиала ОАО «РусГидро» - «Чебоксарская ГЭС, год рождения — 11.05.1950 г. Окончил в 1975 году Московский энергетический институт; специалист в области РЗА, по совместительству преподаёт на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета, читает курс лекций по дисциплине «эксплуатация оборудования электростанций».



#### **Несмеянов Дмитрий Алексеевич**

специалист по маркетингу РЗА отдела технического маркетинга ООО НПП «ЭКРА». Магистрант II курса Электроэнергетического факультета Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова.

УДК 621.311: 621.317

Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И.

## КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В ЦЕПЯХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Аннотация:** в статье рассмотрена взаимосвязь возможности ложного срабатывания устройств релейной защиты и автоматики от построения системы контроля изоляции. Предложена автоматическая система определения фидера с замыканием на землю.

**Ключевые слова:** сеть оперативного постоянного тока, система контроля сопротивления изоляции.

Alimov U.N., Galkin I.A., Shavarin N.I.

### INSULATION CONTROL IN CONTROL DIRECT-CURRENT CIRCUITS

Abstract: In the article the correlation of the opportunity of a malfunction of devices of the relay protection and automatics from the integration of the insulation control system was discussed.

Keywords: control direct-current network, control system of insulation resistance.

Надежность сети оперативного постоянного тока (СОПТ) зависит от множества факторов и технических решений, в том числе от построения системы контроля изоляции. Традиционная мостовая схема контроля сопротивления изоляции СОПТ, основанная на использовании трех последовательно соединенных резисторов, одно из которых выполнено в виде потенциометра П2ДС, и реле напряжения постоянного тока РН-51/32 [1], не позволяет определить присоединение с замыканием на землю.

В системах оперативного постоянного тока нашли применение устройства контроля изоляции, позволяющие определить присоединения с ухудшенной изоляцией, например «Микро-СРЗ» (НПЦ «Энергоавтоматика»), «Сапфир» и «Скиф» (Белэнергоремонтналадка), ИПИ-1М (ОРГРЭС), УКИ-МП и СПК (ЮРГТУ), устройства фирм ГОСАН, НИПОМ, Bender, Merlin Gerin и т.д. Эти устройства от-

личаются по применяемым способам измерения сопротивления изоляции и полученным на их основе характеристикам.

Проведенный анализ систем контроля изоляции показал, что эти устройства используют следующие способы измерения сопротивления изоляции, основанные:

- на наложении на сеть линейно-изменяющегося напряжения (ИПИ-1М);
- на наложении на сеть одно или двухполярного напряжения прямоугольной формы от регулируемого источника постоянного тока (устройства ФГУП «ЦНИИ судовой электротехники и технологии»);
- на наложении на сеть импульсов напряжения прямоугольной формы относительно земли (УКИ-3);
- на наложении на сеть напряжения контрольного источника переменного тока («Сапфир», «Скиф», устройства НИПОМ, ГОСАН, Merlin Gerin);
- на подключении к шинам аккумуляторной батареи R импеданса («Микро-СРЗ», устройства Bender);
- на применении мостовой схемы с включением в ее диагональ измерительного прибора (УКИ-2).

Разработанные на основе существующих способов устройства контроля изоляции и поиска поврежденного присоединения отличаются главным образом следующими параметрами:

- предельное селективно определяемое снижение сопротивление изоляции (10...50 кОм);
- максимальная суммарная емкость контролируемой сети (до 50 мкФ) и присоединения (до 5 мкФ);
- число автоматически контролируемых присоединений (до 247 шт.);
- величина напряжения генератора опорного сигнала (до 300 В) или величина инжектируемого в оперативную сеть тока (1... 50 мА);
- внутреннее сопротивление полюса устройства относительно земли (10...360 кОм).

Сравнение характеристик некоторых систем контроля изоляции приведено в таблице 1.

В стандарте ОАО «ФСК ЕЭС»: «Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования» (приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» №191 от 29.02.2010) приведено следующее требование к системам контроля изоляции в СОПТ:

- поиск земли должен обеспечиваться без отключения электроприемников и без инъекции в сеть СОПТ токов, способных вызвать ложное срабатывание устройств релейной защиты и

Таблица 1

Фирма	Диапазон измеряемых сопротивлений изоляции сети, кОм	Максимально определяемое сопротивление изоляции поврежденного присоединения, кОм	Максимальное число автоматически контролируемых присоединений	Амплитуда напряжения генератора контрольного тока при поиске поврежденного присоединения, В	Ток контрольного источника тока, мА	Максимальная емкость контролируемой сети, мкФ	Внутреннее сопротивление полюса устройства относительно земли, кОм	Время поиска поврежденного присоединения, сек	Возможность работы совместно со стандартной мостовой схемой
Bender	1...10000	50	12...360	*	1...50	20	360	25	нет
Merlin Gerin	0.1...999	100	12...*	*	5	6...*	20	40...*	нет
НТЦ ГОСАН	*	50	32	350	25	30	*	180	нет
Белэнерго Ремналадка	1...100	50	20...100	70	*	30	*	*	нет
НТЦ Энергоавтоматика	2...16000	2...100	40...247	*	3.5	50	200	*	нет

\* Примечание. По этим позициям данные отсутствуют.

противоаварийной автоматики, при этом инжектируемый в сеть ток должен быть менее 1,8 мА.

Как видно важной характеристикой устройств контроля изоляции оперативного постоянного тока и автоматического поиска поврежденного присоединения является исключение ложного срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики РЗА вследствие работы устройств контроля изоляции или ухудшения сопротивлений изоляции СОПТ при замыкании на землю в цепях РЗА.

При установке в сети СОПТ одной из приведенных в таблице 1 систем приходится исключать традиционную мостовую схему контроля сопротивления изоляции, так как ни одна из существующих систем с автоматическим поиском поврежденного присоединения не позволяет совместную работу с этой традиционной схемой. Исключение из СОПТ стандартной схемы контроля изоляции на основе Т-образного моста, которая обладает малым эквивалентным (примерно 9 кОм) сопротивлением каждого полюса относительно «земли» повышает вероятность ложного срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА).

Данное утверждение основывается на анализе схемы замещения СОПТ (рис.1), где  $R_{\partial+}$  и  $R_{\partial-}$  – сопротивления выравнивающих резисторов,  $R_{изол+}$  и  $R_{изол-}$  – сопротивления изоляции соответственно положительного и отрицательного полюса СОПТ относительно «земли»,  $C_+$  и  $C_-$  – емкости полюсов соответственно положительного и отрицательного полюса СОПТ,  $R_{ex}$  – сопротивление обмотки реле повторителя, например газовой защиты, или входа платы приема дискретных сигналов 2; 3-«сухие» контакты.

До замыкания на «землю» входа этой платы напряжение на положительном полюсе сети относительно «земли»  $U_+ = U_{AB} * (R_{изол+} // R_{\partial+}) / (R_{изол+} // R_{\partial+} + R_{изол-} // R_{\partial-})$ , напряжение на отрицательном полюсе

сети относительно «земли»  $U_- = U_{AB} * (R_{изол-} // R_{\partial-}) / (R_{изол+} // R_{\partial+} + R_{изол-} // R_{\partial-})$ , где  $U_{AB}$  – напряжение на аккумуляторной батарее. При этом напряжение на входе платы дискретных сигналов  $U_{вх} = 0$ . При сопротивлении изоляции, например,  $R_{изол+} = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_{изол-} \geq 10 \text{ МОм}$  и сопротивлении выравнивающих резисторов  $R_{\partial+} = R_{\partial-} = 200 \text{ кОм}$  напряжения  $U_+ = 55 \text{ В}$ ,  $U_- = 165 \text{ В}$  при напряжении на аккумуляторной батарее  $U_{AB} = 220 \text{ В}$ .

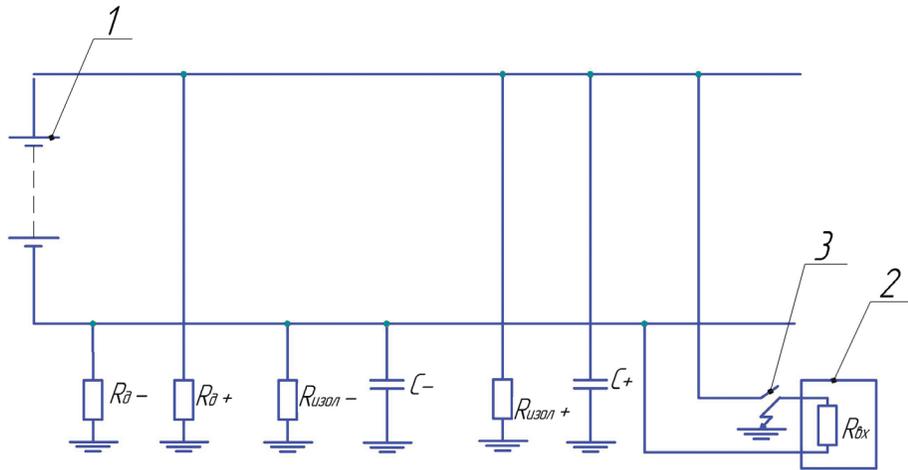


Рис. 1. Схема замещения сети оперативного постоянного тока, где 1 – аккумуляторная батарея, 2 – реле повторителя, например, газовой защиты или плата дискретных сигналов РЗА, 3 – сухие контакты

При замыкании на «землю» входа платы дискретных сигналов напряжение на входе в момент замыкания скачком увеличивается до значения 165В, а затем с постоянной времени  $t = 2 * C * (R_{изол+} // R_{\partial+} // R_{изол-} // R_{\partial-} // R_{вх})$  уменьшается до величины  $U_{вх} = U_{AB} * (R_{изол-} // R_{\partial-} // R_{вх}) / (R_{изол+} // R_{\partial+} + R_{изол-} // R_{\partial-} // R_{вх})$ . Например, при сопротивлении  $R_{вх} = 50 \text{ кОм}$  напряжение на входе платы после завершения переходного процесса составит  $U_{вх} = 82 \text{ В}$ . При емкости сети  $C = 10 \text{ мкФ}$  постоянная времени составит  $t = 0.5$  секунды, что бывает достаточно для ложного срабатывания РЗА. Очевидно, что чем меньше величина выравнивающего сопротивления, тем меньше величина напряжения на дискретном входе при замыкании его на «землю».

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжений на входе

(1) и выходе (2) платы дискретных сигналов при замыкании на землю входа платы для одного из случаев. При сопротивлении выравнивающих резисторов  $R_{\partial+} = R_{\partial-} = 10 \text{ кОм}$  и тех же величинах сопротивлений изоляции и напряжении аккумуляторной батареи напряжение на входе платы в момент замыкания составит 115В.

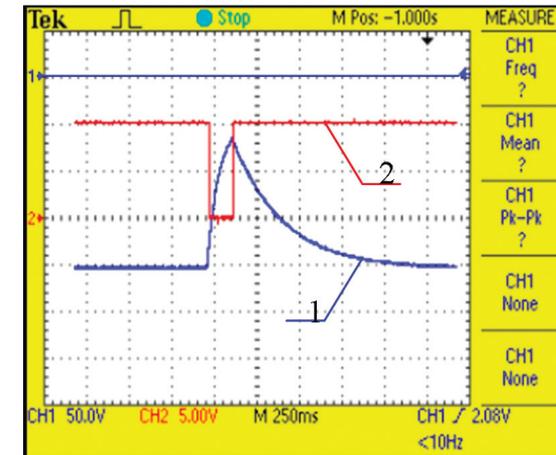


Рис. 2. Осциллограмма напряжений на входе (1) и выходе (2) платы дискретных сигналов при замыкании на «землю» при  $R_{изол+} = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_{изол-} \geq 10 \text{ МОм}$ ,  $R_{\partial+} = R_{\partial-} = 200 \text{ кОм}$ ,  $C = 10 \text{ мкФ}$ ,  $U_{AB} = 220 \text{ В}$ . Цена деления напряжения на входе – 50 В, цена деления напряжения на выходе – 5 В, цена деления времени – 250 мсек.

Спрашивается, какие должны быть требования к уровню срабатывания логических входов микропроцессорных устройств и электромеханических реле?

Ориентировочный расчет допустимого диапазона напряжений срабатывания для дискретных входов терминалов может быть выполнен с учетом следующих требований:

1. максимальное значение  $U_{ср.макс}$  – по условиям обеспечения срабатывания дискретного входа при минимально допустимом напряжении в сети оперативного постоянного тока (СОПТ);
2. минимальное значение  $U_{ср.мин}$  – по условиям обеспечения несрабатывания дискретного входа при замыкании его цепи на землю в СОПТ и появления на нем напряжения из-за протекания тока перезаряда распределенной емкости СОПТ (зарядной емкости).

Причем, требование п. 2 является наиболее жестким, так как обычно в СОПТ поддерживается напряжение, близкое к максимальному значению.

В соответствии с требованиями отечественных руководящих документов: «устройства РЗА должны правильно функционировать при

изменении напряжения оперативного постоянного тока от 0,8 до 1,1 номинального значения...».

Тогда, в соответствии с требованием п.1:

$$U_{ср.мах} \leq 0,8 U_{ном} = 0,8 * 220 = 176 В.$$

Кроме этого, для выполнения условий электромагнитной совместимости (ЭМС): « Устройства РЗА должны быть устойчивы к пульсациям напряжения, воздействующим на сеть электропитания постоянного тока, по ГОСТ Р 51317.4.17 (МЭК 61000-4-17-99) при степени жесткости 4 (размах пульсаций напряжения электропитания -15 %, частота пульсаций кратна частоте переменного электропитания с множителем 2) ...».

Отстройка от пульсаций может быть выполнена реализацией задержек по времени на дискретных входах или уменьшением максимально допустимой величины напряжения срабатывания:

$$U_{ср.мах} \leq 0,8 U_{ном} - 0,075 U_{ном} = 0,8 * 220 - 0,075 * 220 = 160 В.$$

Требование п.2 при применении стандартной схемы контроля сопротивления изоляции СОПТ (основанной на использовании трех последовательно соединенных резисторов, одно из которых выполнено в виде потенциометра, и реле типа РН-51/32), сводится к обеспечению несрабатывания дискретного входа при снижении напряжения на нем примерно в два раза. Отсюда:

$$U_{ср.мин} \geq (1,1 U_{ном} + 0,075 U_{ном}) / 2 = (1,1 * 220 + 0,075 * 220) / 2 = 130 В.$$

Таким образом, можно принять за допустимый диапазон напряжения срабатывания дискретных входов терминала: (130...160) В. Такие же требования применимы и к электромеханическим реле. При этом желательно иметь высокий коэффициент возврата.

Поэтому для исключения ложного срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики РЗА в СОПТ устройство контроля изоляции с автоматическим определением поврежденного присоединения должно не только позволять совместную работу с традиционной схемой контроля изоляции, но и найти поврежденное присоединение с сопротивлением не менее 50...60 кОм.

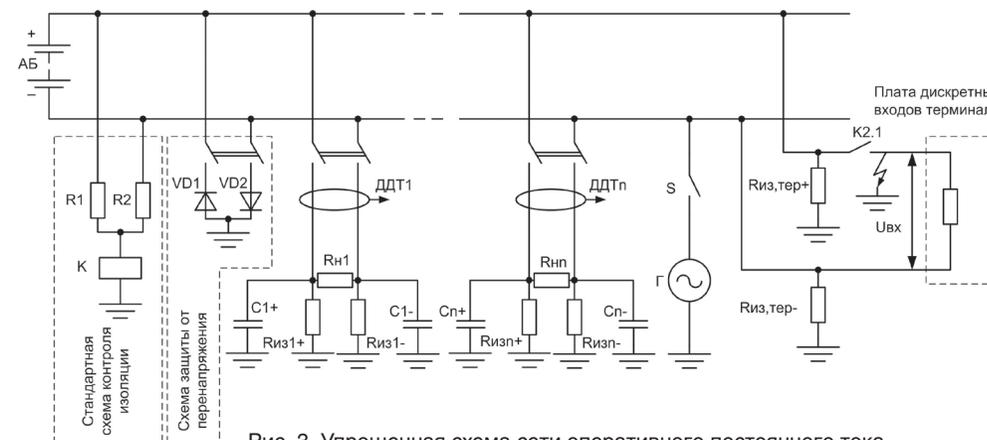


Рис. 3. Упрощенная схема сети оперативного постоянного тока

Анализ схемы СОПТ (рис. 3) и проведенные исследования показывали, что в случае поиска поврежденного присоединения устройством контроля изоляции использующего наложение на сеть оперативного постоянного тока напряжения контрольного источника переменного тока («Сапфир», «Скиф», устройства НИПОМ, ГОСАН, Merlin Gerin) при напряжении генератора контрольного тока 50В и при «металлическом» замыкании входа платы дискретных сигналов на «землю» практически при любом значении сопротивления изоляции положительного полюса аккумуляторной батареи на «землю» напряжение на входе платы дискретных входов превысит 138 В, что может привести к появлению ложных сигналов устройств защиты.

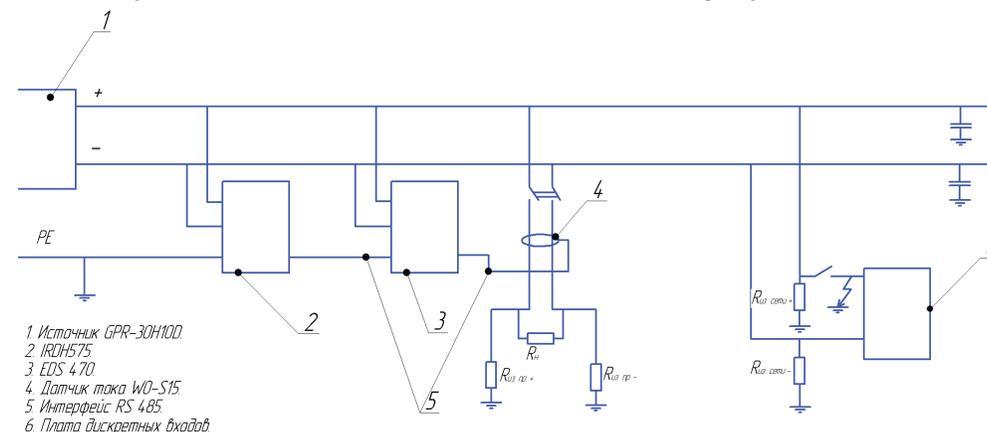


Рис. 4. Схема испытаний устройства контроля изоляции Bender (IRDH-575, EDS470, датчик W0-S15)

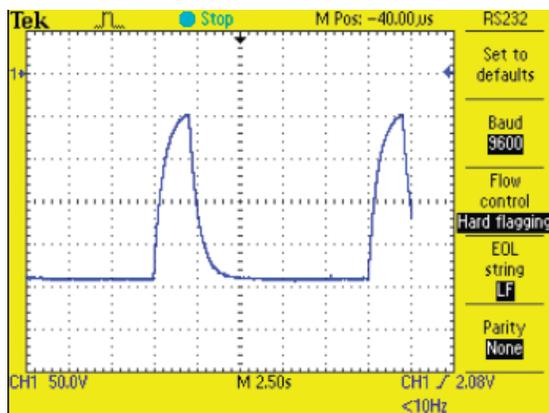


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на положительном полюсе сети оперативного тока в режиме поиска поврежденного присоединения устройством IRDH-575 при емкости сети 20 мкФ, сопротивлении изоляции 20 кОм и токе 10 мА. Цена деления напряжения – 50В, цена деления времени – 250 мсек.

достигает величины 180 В при сопротивлении изоляции присоединения 20 кОм и выше, что достаточно для срабатывания дискретного входа в случае металллического замыкания его на «землю» (рис. 4, 5).

Применение устройств контроля изоляции цепей газовой защиты трансформаторов в СОПТ, например, устройства «Орион-КИ» обычно связано с применением традиционной схемы контроля сопротивления изоляции. В случае отказа от применения в СОПТ традиционной схемы контроля сопротивления изоляции возможно ложная работа устройства «Орион-КИ» даже при хорошей изоляции кабеля соединяющего контакты реле газовой защиты и входа «Орион-КИ». Проведенные исследования показали, что при сопротивлении изоляции кабеля соединяющего контакты реле газовой защиты и входа «Орион-КИ»  $R_{каб}$  более 1 Мом и сопротивлении изоляции входа устройства «Орион-КИ» относительно земли  $R_{из\ вх}$  900 кОм при сопротивлении положительного полюса СОПТ  $R_{изол+}$  менее 100 кОм происходит ложное срабатывание «Орион-КИ» (рис. 6).

В случае поиска поврежденного присоединения устройством контроля изоляции, использующим способ, основанный на подключении к шинам аккумуляторной батареи R импеданса (устройством IRDH-575 Bender), напряжение на поврежденном фидере в режиме поиска при токе 10 мА и более

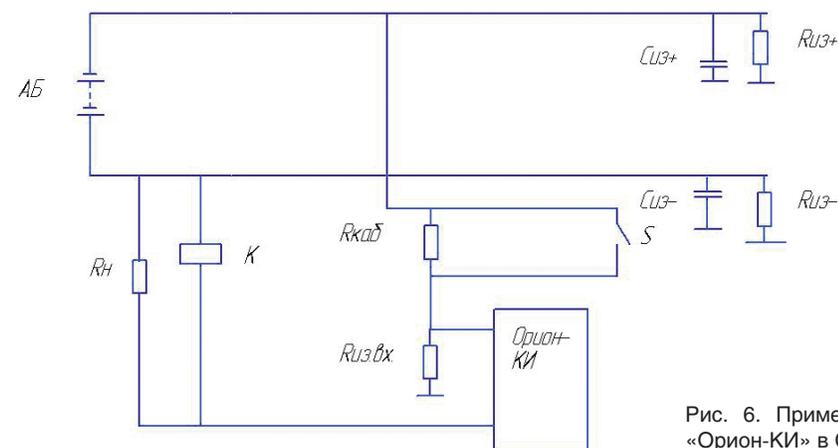


Рис. 6. Пример подключения «Орион-КИ» в СОПТ

ООО НПП «ЭКРА» получен патент на способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети оперативного постоянного тока 220 В [2], на основе которого разработано устройство контроля изоляции, позволяющее совместную работу со стандартной схемой контроля сопротивления изоляции СОПТ и не вызывающее при контроле изоляции и поиске поврежденных присоединений ложных сигналов устройств релейной защиты.

Способ измерения сопротивлений изоляции сети постоянного тока основан на измерении напряжений между «землей» и ее полюсами, а также токов, протекающих по присоединениям сети после подключения сначала к одному, а затем к другому полюсу резистивного элемента при одновременном выравнивании напряжений на полюсах сети.

Схема системы оперативного постоянного тока с предлагаемым способом определения сопротивлений изоляций сети постоянного тока и поиска поврежденного присоединения представлена на рис. 7, на котором изображены аккумуляторная батарея 14, нагрузки присоединений 1,2,3 с емкостями и активными сопротивлениями их изоляции, резистивные элементы 4 и 5, подключенные через ключи к полюсам + и – соответственно, устройства для измерений напряжения 6 и 7, дифференциальные датчики для измерения токов,

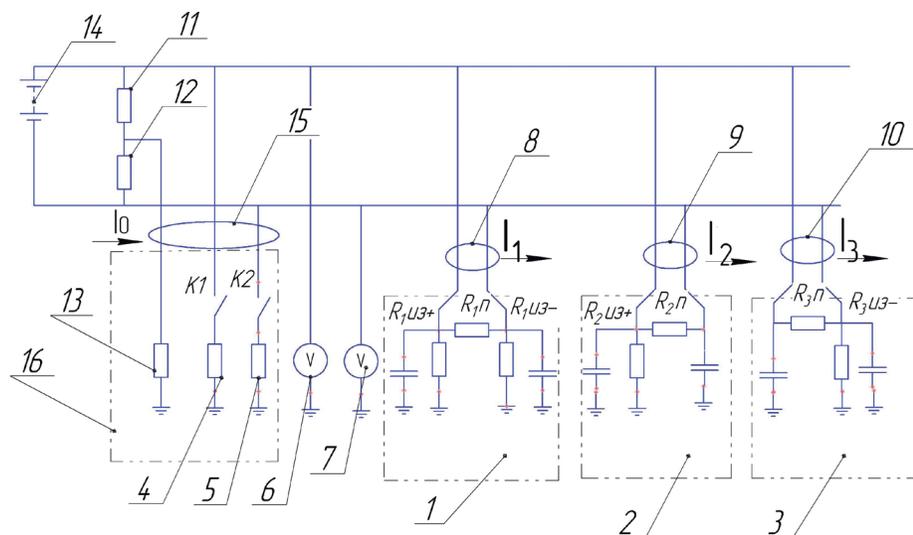


Рис. 7. Схема системы оперативного постоянного тока с предлагаемым способом определения сопротивлений изоляций сети постоянного тока и поиска поврежденного присоединения

протекающих по присоединения 1,2,3, резисторы 11,12, соединенные последовательно и подключенные параллельно полюсам источника 14, резистор 13, подключенный между общей точкой резисторов 11,12 и «землей», и дифференциальный датчик для измерения тока, протекающего по присоединению 16. Дифференциальные датчики 8,9,10 контролируют изоляцию присоединений 1,2,3. Дифференциальный датчик 15 контролирует изоляцию всей сети оперативного тока.

На основе разработанного способа измерения сопротивлений изоляции сети постоянного тока создана система контроля сопротивлений изоляции в сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ» предназначенная для определения присоединений с поврежденной изоляцией без отключения потребителей от сети, а также для контроля сопротивлений изоляции каждого полюса относительно «земли» сети постоянного тока в целом.

На рис. 8 приведена функциональная схема системы контроля изоляции «ЭКРА-СКИ».

В состав «ЭКРА-СКИ» входит:

- блок автоматики (БА) с панелью оператора (ПО) (рис. 9);
- блок дополнительных резисторов (БДР) в случае отсутствия стандартной схемы контроля сопротивления изоляции;
- датчики дифференциальных токов ДДТ1...ДДТN контроля изоляции отдельных присоединений;
- дополнительные источники питания с выходным напряжением =24 В для питания блока автоматики и датчиков дифференциальных токов.

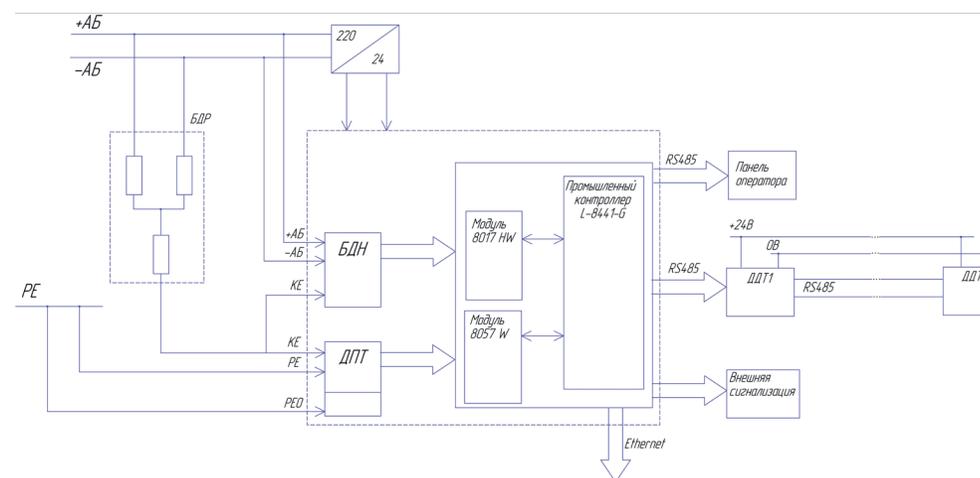


Рис. 8. Функциональная схема системы контроля изоляции сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ»



Рис. 9. Внешний вид блока автоматики «ЭКРА-СКИ»

В состав блока автоматики входит:

- блок делителей напряжения (БДН);
- датчик полного тока (ДПТ) контроля сопротивления изоляции сети оперативного тока в целом;

- контроллер совместно с модулем аналоговых входов и модулем дискретных выходов.

Система контроля изоляции в сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ» имеет два режима работы: режим контроля сопротивления изоляции полюсов сети оперативного тока и режим автоматического поиска поврежденного присоединения. В режиме контроля сопротивления изоляции полюсов сети оперативного тока производится контроль дифференциального тока присоединения блоков добавочных резисторов и делителей напряжений. В этом режиме производится контроль изоляции всей системы оперативного постоянного тока. В случае если величина полного сопротивления сети становится ниже величины уставки заданной программно (на заводе-изготовителе установлено сопротивление изоляции сети значения 150 кОм), а также при истечении времени контроля сопротивления изоляции полюсов сети, заданного в меню панели оператора система «ЭКРА-СКИ» переходит в режим автоматического поиска поврежденного присоединения, при котором производится измерения сопротивлений изоляции всех присоединений, на которых установлены датчики дифференциальных токов и всей сети оперативного постоянного тока в целом. Измерения производятся после подключения поочередно сначала к одному полюсу, а затем к другому полюсу контролируемой сети постоянного тока делителей напряжений, один из выводов которых соединен с «землей». Управляемые ключи и делители напряжений расположены в блоке делителей напряжений (БДН). Одновременно производится измерение напряжения между полюсами аккумуляторной батареи, а также напряжений на полюсах аккумуляторной батареи относительно «земли».

Величины значений сопротивлений плеч делителей напряжений выбраны таким образом, чтобы величина амплитуды напряжения смещения нейтрали в режиме измерения сопротивлений присоединений не превышала 15 В. Величина амплитуды напряжения на поврежденном фидере в режиме измерения сопротивлении изоляции присоединения

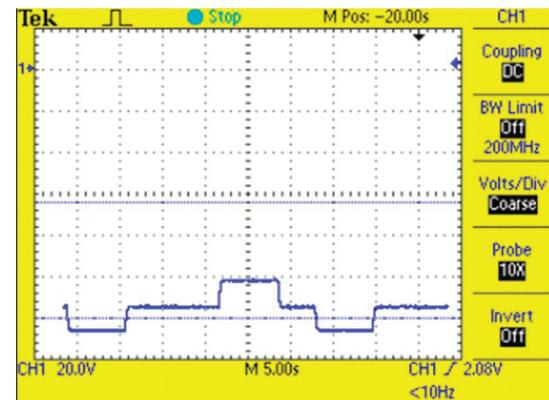


Рис. 10. Осциллограмма напряжения на отрицательном полюсе сети постоянного оперативного тока в режиме измерения сопротивлений изоляции присоединений и всей сети оперативного тока. Цена деления напряжения – 20 В, цена деления времени- 5 сек.

не превышает величины 130 В, что не достаточно для срабатывания дискретного входа в случае металлического замыкания его на «землю» (рис. 10).

Блок добавочных резисторов (БДР) включает в себя резисторы R1 и R2, которые имеют тоже значения, что и в стандартной схеме контроля изоляции.

Резистор R3 имеет значение 3,8 кОм, что соответствует эквивалентному сопротивлению обмотки реле РН-51/32. БДР выполняет функцию выравнивания напряжения на полюсах аккумуляторной батареи относительно «земли», связанного с ухудшением изоляции системы оперативного постоянного тока и отдельных присоединений, а также работой самой системы «ЭКРА-СКИ».

Контроллер управляет работой реле БДН и датчиков дифференциальных токов, а также на основе полученных значений напряжений от БДН и токов от датчиков дифференциальных токов контроллер производит вычисление значений полного сопротивления изоляции всей системы, полного сопротивления изоляции каждого присоединения с указанием полярности поврежденного полюса.

Информация о состоянии изоляции присоединений и сети оперативного тока в целом выводится на панель оператора. Одновременно на панель оператора выводится информация об исправности датчиков дифференциальных токов, об отклонении от нормы напряжения аккумуляторной батареи, об отклонении напряжений на полюсах контролируемой сети постоянного тока относительно «земли» от величины уставки, а также об исправности подсоединения системы «ЭКРА-СКИ» к шине

«РЕ», об исправности интерфейса, связующего датчики дифференциальных токов и контроллер системы, об установленном режиме работы системы.

Блок автоматики имеет разъем Ethernet для взаимодействия с АСУ ТП по протоколу 60870-5-104. Кроме этого контроллер ведет архив событий, текущие значения сопротивлений и архив событий можно посмотреть на компьютере.

Для контроля токов утечки в присоединениях СОПТ разработаны датчики дифференциальных токов, принцип работы таких устройств основан на смещении петли гистерезиса магнитопровода в измерительной обмотке при появлении дифференциального тока в «плюсовом» и «минусовом» проводах присоединения (рис. 11). Магнитопровод содержит также дополнительную тестовую обмотку подключенную к источнику калибровочного тока с помощью которой производится тестирование датчика. С помощью интерфейсного устройства RS485 датчики дифференциальных токов обмениваются сообщениями с контроллером блока автоматики. Каждый датчик дифференциального тока имеет свой адрес (1...255), который задается с помощью переключателя. Датчик дифференциального тока с адресом 0 установлен в блоке автоматики для измерения полного дифференциального тока.

На корпусе датчика расположены светодиоды желтого и крас-



Рис. 11. Внешний вид датчиков дифференциальных токов

ного цвета. Зажигание светодиода желтого цвета показывает о приеме сигнала датчиком по интерфейсу RS485. Зажигание светодиода красного цвета в режиме постоянного свечения показывает о неисправности датчика. Зажигание светодиода красного цвета в импульсном режиме показывает о снижении сопротивления изоляции присоединения ниже уставки «Предупреждение». На корпусе датчика имеется разъемы для подключения источника питания =24 В и выхода интерфейса RS485.

Основные параметры системы контроля изоляции в сети оперативного постоянного тока «ЭКРА-СКИ» приведены в таблице 2.

Таблица 2

№ п.п.	Наименование параметра	Величина
1	Напряжение питания, В	=110...245
2	Потребляемая мощность системы..... датчика дифференциального тока, Вт.....	10 1
3	Номинальное напряжение контролируемой сети постоянного тока, В	=220 <sup>+10%</sup> .. <sub>-20%</sub>
4	Диапазон определяемого сопротивления изоляции сети, кОм	1...1000
5	Максимальная емкость контролируемой сети, не более, мкФ	200
6	Предельное селективно-определяемое снижение сопротивления изоляции присоединения, не более, кОм	100
7	Погрешность определения сопротивления изоляции полюсов сети в диапазоне: 1...100 кОм, 100...1000кОм	10...15% 20%
8	Число автоматически контролируемых присоединений, не более, шт.	255
9	Количество уставок величин сопротивлений изоляций полюсов	2
10	Количество уставок величин сопротивлений изоляций присоединений	2
11	Диапазон задаваемых сопротивлений изоляций уставок, кОм	10...100
12	Время цикла контроля токов утечки всех отходящих присоединений, не более, сек.	2
13	Время цикла измерения сопротивлений всех присоединений, не более, сек.	20
14	Амплитуда напряжения смещения нейтрали в режиме измерения сопротивлений присоединений, не более, В	15
15	Максимальный диаметр окна датчика дифференциального тока, присоединения..... ввода....., мм	25...45 70



Рис. 12. Фотография шкафа распределения оперативного тока с системой контроля изоляции «ЭКРА-СКИ».

Опытный образец системы контроля сопротивлений изоляции в сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ» находится в эксплуатации на подстанции «Бугульма-110» с августа 2009 года. В настоящее время шкафы СОПТ с системой «ЭКРА-СКИ» и системой мониторинга установлены на Калининградской ТЭЦ-2. Опыт эксплуатации «ЭКРА-СКИ» положительный, получен сертификат соответствия требованиям нормативных документов. В 2011 году выпол-

нена поставка систем «ЭКРА-СКИ» для объектов Нижнекамской ГЭС, Курской АЭС, Северо-Западной ТЭЦ, ПС «Ясногорская», Рязанского нефтеперерабатывающего комплекса, планируется аттестация системы «ЭКРА-СКИ» для применения на объектах ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Концерн Росэнергоатом».

### Выводы:

1. Предложено устройство контроля сопротивлений изоляции присоединений и сети оперативного постоянного тока с напряжением 220 В «ЭКРА-СКИ», позволяющее совместную работу со стандартной схемой контроля сопротивления изоляции СОПТ и не вызывающее ложную работу РЗА.
2. Опыт эксплуатации «ЭКРА-СКИ» на подстанции «Бугульма-110» и Калининградской ТЭЦ-2 в течение 2009-2010 г. положительный.
3. Предложенная система контроля изоляции и автоматического поиска замыканий на землю имеет связь с АСУ ТП,

обеспечивает мониторинг сети и архив событий.

4. Технические характеристики системы «ЭКРА-СКИ» удовлетворяют всем современным требованиям.

### Литература:

1. Электротехнический справочник. В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии. 8-е изд., исп. и доп.-М.: Изд. МЭИ, 2002.-964с.
2. Патент РФ №2381513.МПК G01R27/18. Способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети постоянного тока с изолированной нейтралью, устройство для его осуществления и дифференциальный датчик для этого устройства /Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И. Оpub.10.02.2010 (приоритет от 16.07.2008).

### Сведения об авторах



#### **Алимов Юрий Николаевич**

заместитель технического директора по РЗА. Окончил Новочеркасский политехнический институт в 1960 году, там же в 1975 году защитил диссертацию на соискание звания кандидата технических наук.



#### **Галкин Игорь Александрович**

ведущий инженер отдела НКУ. Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова в 1974 году. В 1988 году в Омском политехническом институте защитил диссертацию на соискание звания кандидата технических наук по теме «Разработка индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов».



#### **Шаварин Николай Иванович**

главный специалист отдела НКУ. Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова в 1977 году. В 1987 году в Московском Энергетическом институте защитил диссертацию на соискание звания кандидата технических наук по теме «Разработка цифровых систем управления с низкой чувствительностью к изменению параметров».

УДК 62-83:621.3.07:681.527.2

## В.И. Вишнеvский АДАПТИВНЫЙ НЕЧЁТКИЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РЕЖИМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Аннотация:** в статье предложен алгоритм адаптивного нечёткого скользящего режима управления (FSMC) для асинхронного электродвигателя с неизвестными параметрами и нагрузочным моментом. Предложенный адаптивный нечеткий логический контроллер использует преимущества SMC и пропорционально-интегрального (PI) регулятора. Представлен анализ устойчивости FSMC согласно теории устойчивости Ляпунова. Уменьшена вибрация SMC и обеспечена нечувствительность к неопределённым внешним возмущениям. Для проверки эффективности предложенного метода представлены результаты моделирования для асинхронного электродвигателя 5AM112M4 10 кВт.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, адаптивный нечёткий скользящий режим управления, пропорционально-интегральный (ПИ) – регулятор, анализ устойчивости, метод Ляпунова.

V.I. Vishnevskiy

### THE ADAPTIVE FUZZY SLIDING-MODE CONTROL SPEED OF INDUCTION MOTOR.

In this paper, an adaptive fuzzy sliding mode control (FSMC) algorithm has been proposed for induction motor with the unknown parameter and load torque. The proposed adaptive fuzzy logic controller takes advantages of both SMC and proportional integral (PI) control. Stability analysis based on Lyapunov theory is presented. The chattering action of SMC is attenuated and robust performance to unknown external disturbance can be ensured. The simulations results for a IM 5AM112M4 10 kW are presented to verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** induction motor, adaptive fuzzy sliding-mode control, proportional integral (PI) control, stability analysis, Lyapunov approach.

При решении задач автоматизации технологических процессов наметилась тенденция к поиску общих принципов синтеза нелинейных систем управления сложными объектами, которые бы учитывали и использовали свойства объекта управления. При управлении сложными нелинейными объектами обычно применяют два подхода. Первый подход состоит в том, что разрабатывают для объекта математическую модель, которая может иметь достаточно сложную форму, содержать большое число эмпирических коэффициентов, идентификация которых может задачей, имеющей очень сложное решение. При другом подходе, применяя эвристические алгоритмы, используя показания контрольно-измерительных приборов, опыт и моделирование, разрабатывают системы управления в виде нечетких контроллеров, которые справляются с управлением сложными объектами достаточно уверенно [3,6,7,10,14,15,17,18].

Среди нелинейных объектов управления, несомненно, одно из ведущих мест занимает автоматизированный электропривод (ЭП), который характеризуется релейной нелинейностью, обусловленной работой полупроводниковых приборов, и нелинейностью, присущей машинам переменного тока. Таким образом, автоматизированный асинхронный электропривод представляет собой нелинейную динамическую систему с линейным вхождением управления, разрывный характер которого обусловлен ключевым режимом работы полупроводникового преобразователя.

Развитие современной теории нелинейных систем с разрывным управлением позволило разработать методы синтеза нелинейных законов управления асинхронного электропривода на скользящих режимах. Реализация управления на базе многомерного скользящего режима невозможна без обеспечения должной информации о компонентах вектора состояния объекта управления, прямое измерение которых нецелесообразно по причине усложнения и

удорожания объекта управления и снижения его эксплуатационных качеств. Перспективный путь решения поставленной задачи лежит в разработке алгоритма, оценивания вектора состояния объекта по его наблюдаемым координатам [1].

Классическую динамическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) в относительной системе единиц и в системе координат неподвижных относительно обмоток статора представляется системой дифференциальных уравнений [8,9]:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \mathbf{i}_s^s + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r^s}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{u}_s^s \\ \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r^s}{dt} = -R_r \frac{L_m}{L_r} \mathbf{i}_s^s - \frac{R_r}{L_r} \boldsymbol{\Psi}_r^s + jp\omega \boldsymbol{\Psi}_r^s, \\ T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{ra}^s i_{sb}^s - \Psi_{rb}^s i_{sa}^s) \\ J \frac{d\omega_M}{dt} = T_e - f_c \omega_M - T_L, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega_M$ ,  $\omega$  – угловая механическая и электрическая скорость ротора,  $\boldsymbol{\Psi}_r^s = [\Psi_{ra}^s \Psi_{rb}^s]^m$ ,  $\mathbf{u}_s^s = [\mathbf{u}_{sa}^s \mathbf{u}_{sb}^s]^m$ ,  $\mathbf{i}_s^s = [\mathbf{i}_{sa}^s \mathbf{i}_{sb}^s]^m$  – пространственные векторы потока ротора и статора, напряжения и тока статора в осях статора;  $T_e$ ,  $T_L$  – электромагнитный и нагрузочный момент;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $R_s$ ,  $R_r$ ,  $p$ ,  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Система уравнений (1) учитывает основные физические особенности процессов, протекающих в АД, при следующих стандартных допущениях: магнитодвижущие силы, создаваемые фазными токами, имеют синусоидальное распределение вдоль воздушного зазора, симметричность электродвигателя, насыщения и потери в стали не учитываются, энергия электростатического поля не учитывается, процессы являются сосредоточенными, т.е. пренебрегаются волновые явления распространения электромагнитного поля. При питании АД от источника постоянного напряжения  $\pm u_o$  через транзисторный инвертор напряжения, каждое из выходных напряжений фаз преобразователя связано с компонентами напряжения статора АД линейным соотношением:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_{Aa} e_{Ba} e_{Ca} \\ e_{Ab} e_{Ab} e_{Ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix},$$

где  $(e_{Aa} e_{Ab}), (e_{Ba} e_{Bb}), (e_{Ca} e_{Cb})$  – компоненты направляющих ортов фаз А,В,С. При ориентации оси фазы А по оси  $a$ , то:  $e_A^T = (1,0)$ ,  $e_B^T = (-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$ ,  $e_C^T = (-\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2})$ . Таким образом, комплекс СУ(система управления)-ПП-АД, рассматриваемый как объект системы управляемого электропривода, является сложным нелинейным динамическим объектом с двумя регулируемыми выходными координатами, одна из которых характеризует механическое состояние машины –  $\omega(t)$ , а другая – состояние магнитной цепи –  $\boldsymbol{\Psi}_r$ , и тремя бинарными управляющими воздействиями – командами управления силовыми ключами [8,9].

При работе электродвигателя в составе ЭП целью управления является обеспечение сходимости угловой скорости вращения ротора

$$e_\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\omega(t) - \omega_Z(t)\| = 0, \quad (2)$$

с желаемой динамикой, при произвольном характере изменения момента внешней нагрузки, обеспечение высокого качества процессов управления, инвариантность к внешним возмущениям, малую чувствительность к изменениям динамических свойств объекта управления в сочетании с экономичностью передачи энергии и простотой получения вращающегося момента. Ввиду того, что реальным физическим управлением являются команды управления ключами полупроводникового преобразователя, определяющие величину и знак разрывного управления, то задача управления заключается в формировании команд управления ключами для обеспечения указанных требований. Полная управляемость ЭП обеспечивается, если обеспечивается управление электромагнитным моментом двигателя. Во всех электромеханических преобразователях вращающий момент образуется в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора или магнитного поля одного элемента и тока другого.

Для получения однозначных функций управления обе величины должны быть независимы друг от друга, и тогда одну из них можно поддерживать постоянной, а с помощью другой осуществлять регулирование. В результате выбора пары векторов величин, образующих электромагнитный момент и системы координат, в которой они представлены, можно получить уравнение момента в виде функции независимых проекций этих величин на координатные оси. В качестве независимой и постоянной величины наиболее целесообразным можно считать выбор потокосцепления ротора и выполнение дополнительной цели управления:

$$e_{\Psi} = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\Psi_r - \Psi_{r^*}\| = 0, \quad (3)$$

с желаемой динамикой, где  $\Psi_{r^*}$  – желаемая (эталонная) модель потокосцепления ротора асинхронного электропривода. И тогда управление моментом сведется к управлению проекциями векторов [2].

Для синтеза алгоритмов управления представим классическую динамическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе координат, связанных с вектором потокосцепления ротора [8,9]:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}^s}{dt} = -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\alpha}^s + \frac{k_r L_m}{\sigma L_s L_r} |\Psi_r^s| + \omega_{\Psi_r} i_{s\beta}^s + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha}^s; \\ \frac{di_{s\beta}^s}{dt} = -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\beta}^s - \frac{k_r}{\sigma L_s L_r} p\omega |\Psi_r^s| - \omega_{\Psi_r} i_{s\alpha}^s + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta}^s; \\ \frac{d|\Psi_r^s|}{dt} = R_r k_r i_{s\alpha}^s - \frac{R_r}{L_r} |\Psi_r^s|; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3P^2 k_r}{2J} |\Psi_r^s| i_{s\beta}^s - \frac{f_c}{J} \omega - \frac{PT_L}{J}, \end{cases} \quad (4)$$

Уравнение модуля вектора потокосцепления ротора  $|\Psi_r^s|$  и составляющая тока статора связаны соотношением:  $|\Psi_r^s|(\omega_{\Psi_r} - p\omega) = k_r R_r i_{s\beta}^s$ . По аналогии с системами управления машинами постоянного тока, потокосцепление ротора непосредственно

не зависит от составляющей  $u_{s\alpha}^s$ . Поэтому канал управления  $|\Psi_r^s|$  можно строить двухконтурным с внутренним контуром управления по току статора  $i_{s\alpha}^s$  и с внешним по модулю потокосцепления ротора. Канал управления угловой скоростью ротора также может содержать два контура управления – внутренний, по току статора  $i_{s\beta}^s$  и внешний, по угловой скорости ротора. Заметим, что эта аналогия с машинами постоянного тока весьма условна и при всех преобразованиях объект управления – асинхронный двигатель – остается сложной многосвязной нелинейной системой. В контурах составляющих тока статора  $i_{s\alpha}^s$  и  $i_{s\beta}^s$  присутствуют перекрестные связи, пропорциональные произведениям мгновенных частот вращения вектора роторного потокосцепления и угловой скорости ротора. Именно этот факт и вызывает сомнения в эффективности предлагаемых процедур синтеза методами каскадного управления. Компенсация взаимного влияния контуров регулирования сложна и требует точного знания параметров асинхронного двигателя. Понятно, что осуществить точную компенсацию невозможно. Для устранения возникших ошибок применяют дополнительные интегральные связи [8], обычно рассчитываемые по принципам подчиненного регулирования. В результате существенно увеличивается сложность управляющего устройства. Нелинейность системы привода, неполнота используемого математического описания, полученного при целом ряде упрощающих предположений, сводят на практике задачу синтеза к задаче параметрической оптимизации переходного процесса в рамках заданной структуры по трудно формализуемой совокупности критериев (статическая точность, перерегулирование, быстродействие и т.д.). Представляется, что излишнее усложнение управляющего устройства в данном случае объясняется стремлением применить хорошо разработанные методы синтеза линейных регуляторов, хотя наличие существенной нелинейно-

сти объекта должно было предопределить поиск адекватных нелинейных методов, эффективно решающих задачу управления.

При выбранных задающих воздействиях (2)(3) поведение ЭП характеризуется функциями ошибок управляемых переменных, которыми являются отклонения фактических значений регулируемых величин от задающих воздействий:

$$s = [s_1 \quad s_2]^T = \left[ \left( \frac{d}{dt} + \theta_\psi \right) e_\psi \quad \left( \frac{d}{dt} + \theta_\omega \right) e_\omega \right]^T \quad (5)$$

где  $\theta_i$  – положительная константа. Для решения поставленной задачи управления достаточно обеспечить равенство нулю функций (5). Действительно, уравнение  $s = 0$  можно рассматривать как дифференциальное уравнение на рассогласование фактической и заданной скорости вращения, фактического и заданного потокосцепления ротора, которое при  $\theta_i > 0$  будет стремиться к нулю по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\frac{1}{\theta_i}$ . Одним из возможных вариантов одновременного обеспечения равенства нулю функций (5) является организация скользящего режима по пересечению поверхностей  $s_1 = 0, s_2 = 0$  [2,11,14,17,19].

Из структуры объекта управления (4) выделим группу уравнений, соответствующие контуру регулирования механических характеристик и потокосцеплений ротора, которые представляют собой нелинейную динамическую систему с линейным вхождением управления  $u(i_{s\alpha}^*, i_{s\beta}^*)$ , разрывный характер которого обусловлен работой преобразователя:

$$\begin{aligned} p\mathbf{x}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \xi, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{c}(\mathbf{x}, t), \end{aligned} \quad (6)$$

где:  $p\mathbf{x}(t) = [x_1, x_2]^T = [p|\psi_{r\alpha}|, p\omega]^T$  – матрица доступных для наблюдения координат состояния скорости и потокосцепления ротора,

$$\mathbf{f}(x, t) = \begin{bmatrix} -R_r/L_r & 0 \\ 0 & -f_c/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\psi_r| \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\psi_r| \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(x, t) = \begin{bmatrix} R_r k_r & 0 \\ 0 & \frac{3Pk_r}{2J} |\psi_r^s|^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & m |\psi_r^s|^* \end{bmatrix} -$$

нелинейные матрицы объекта управления – асинхронного электродвигателя,

$u(i_{s\alpha}^*, i_{s\beta}^*)$  – вектор управления системы, представленный в виде проекций токов в системе координат ориентированных относительно потока ротора, и  $\xi = [\Delta a |\psi_r| \quad -\Delta c \omega_r - PT_L/J]^T = [\Delta a |\psi_r| \quad a]^T$  – нелинейная матрица, характеризующая внешнее воздействие, дрейф параметров, которые входят в коэффициенты уравнений, составляющих математическое описание объекта, абстрактные параметры характеризующие неточностью описания объекта,  $y = c(x, t) = x_1$ . По отношению к  $\xi$  движение по многообразию  $s_i(x) = 0$  должно быть инвариантно. Вектор возмущений считаем квазистационарным [6], т.е. меняется существенно медленнее остальных динамических процессов в системе и находится в области допустимых значений  $\forall \xi \in \Xi$ .

Конструкция управления  $u(i_{s\alpha}^*, i_{s\beta}^*)$  для системы нелинейных уравнений (6) согласно закону эквивалентного управления [6,11] строится в виде

$$\begin{aligned} u(i_{s\alpha}^*, i_{s\beta}^*) &= [i_{eq\alpha} + i_{sw\alpha} \quad i_{eq\beta} + i_{sw\beta}]^T \\ [i_{sw\alpha} \quad i_{sw\beta}]^T &= [-\eta_\psi g(x, t)^{-1} \text{sign}(s_1(e_\psi)) \quad -\eta_\omega g(x, t)^{-1} \text{sign}(s_2(e_\omega))]^T, \quad (7) \\ \text{sign}(s(e_\psi)) &= \begin{cases} 1, & s(e_\psi) > 0 \\ -1, & s(e_\psi) < 0 \end{cases}, \quad \text{sign}(s(e_\omega)) = \begin{cases} 1, & s(e_\omega) > 0 \\ -1, & s(e_\omega) < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

которое гарантирует возникновение скользящего режима, при этом  $\eta_\psi > 0, \eta_\omega > 0$ . Доказательство, что управление (7) гарантирует возникновение скользящего режима проводится методом Ляпунова [4,5] с использованием квадратичной формы функции  $s(e_\omega, e_\psi)$ , играющей роль отклонения траектории от поверхности скольжения. Применение управления (7) в задаче описания системы (6) на границе разрыва неадекватно классической теории дифференциальных уравнений [12]. Для применимости классического метода исследования Ляпунова используется схема регуляризации, построенная на использовании пограничного слоя  $\Delta$ :

$$|s(e_\psi, e_\omega)| = (s(e_\psi, e_\omega)^T s(e_\psi, e_\omega))^{1/2} \leq \Delta,$$

где  $\Delta$  – некоторое малое число, зависящее от введённых неидеальностей [11]. Если величина стремится к нулю, то реальный скользящий режим стремится к идеальному. Тогда управление (7) рассматривается класс функций управления, которые приводят к движению в окрестности  $\Delta$ . Зададимся кандидатом функции Ляпунова в виде:  $V_1 = (s(e_\psi, e_\omega)s(e_\psi, e_\omega))^T / 2$ . Найдём скорость изменения  $s(e_\psi, e_\omega)$ :

$$ps(e_\psi, e_\omega) = [p^2 e_\psi + \theta_\psi p e_\psi \quad p^2 e_\omega + \theta_\omega p e_\omega]^T.$$

Учитывая, что производная второго порядка от ошибки координаты состояния и её эталонного выражения:

$$p^2 e = [p^2 e_\psi \quad p^2 e_\omega]^T = p^2 x - x^* = p^2 x^* + p\xi - p^2 x^* = p\xi = p[\Delta a \psi_r \quad d]^T, \text{ то}$$

$$ps(e_\psi, e_\omega) = p \left[ \begin{array}{c} \Delta a |\psi_r| \\ d \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{cc} \theta_\psi & 0 \\ 0 & \theta_\omega \end{array} \right] \left( \left[ \begin{array}{cc} a & 0 \\ 0 & c \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} |\psi_r| \\ \omega \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{cc} k & 0 \\ 0 & m |\psi_r^s| \end{array} \right] \mathbf{u} (i_{s\alpha}^*, i_{s\beta}^*) + \left[ \begin{array}{c} \Delta a |\psi_r| \\ d \end{array} \right] - p \left[ \begin{array}{c} |\psi_r| \\ \omega \end{array} \right]^* \right) =$$

$$p\xi + \theta(\theta_\psi, \theta_\omega) (\mathbf{f}(x, t) + \mathbf{g}(x, t)\mathbf{u} + \xi - p\mathbf{x}^*(t)). \quad (8)$$

Тогда производная от квадратичного функционала примет вид:

$$pV_1 = s(e_\psi, e_\omega)^T ps(e_\psi, e_\omega) = s(e_\psi, e_\omega)^T (p\xi + \theta(\theta_\psi, \theta_\omega) (\mathbf{f}(x, t) + \mathbf{g}(x, t)\mathbf{u} + \xi - p\mathbf{x}^*(t))) \quad (9)$$

При управлении в соответствие с (8):

$\mathbf{u}(i_{eq\alpha} \quad i_{eq\beta}) = \theta^{-1}(\theta_\psi, \theta_\omega) \mathbf{g}^{-1}(x, t) (-\mathbf{l}(\psi_r \quad \omega) s(e_\psi, e_\omega) - \theta(\theta_\psi, \theta_\omega) (\mathbf{f}(x, t) - p\mathbf{x}^*(t) - \eta \text{sign}(s(e_\psi, e_\omega))))$   
 для контуров регулирования скорости и потокосцепления:

$$\mathbf{u}_{eq} = [i_{eq\alpha} \quad i_{eq\beta}]^T = \left[ \begin{array}{c} (-l_\psi s(e_\psi) + a\theta_\psi \psi + \theta_\psi p \psi^*) / \theta_\psi k \quad (-l_\omega s(e_\omega) + c\theta_\omega \omega + \theta_\omega p \omega^*) / \theta_\omega c \end{array} \right]^T,$$

$$\mathbf{u}_{sw} = [i_{sw\alpha} \quad i_{sw\beta}]^T = [\eta_\psi (\theta_\psi k)^{-1} \text{sign}(s(e_\psi)) \quad \eta_\omega (c\theta_\omega)^{-1} \text{sign}(s(e_\omega))]^T, \quad (10)$$

выражение от производной кандидата функции Ляпунова примет вид:

$$pV_1 = - \left[ \begin{array}{cc} l_\psi s_1(e_\psi) & 0 \\ 0 & l_\omega s_2(e_\omega) \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} s_1(e_\psi) \\ s_2(e_\omega) \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{cc} s_1(e_\psi) & 0 \\ 0 & s_2(e_\omega) \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta a \theta_\psi \psi + \Delta a p \psi - \eta_\psi \text{sgn } s_1(e_\psi) \\ \theta_\omega d + p d - \eta_\omega \text{sgn } s_2(e_\omega) \end{array} \right]. \quad (11)$$

Выбирая  $l_\psi > 0, l_\omega > 0, [\eta_\psi \quad \eta_\omega]^T \geq [\max \|\Delta a \theta_\psi \psi + \Delta a p \psi\| \quad \max \|\theta_\omega d + p d\|]^T$  получим, что функция Ляпунова знакоопределённая и отрицательная  $pV_1 \leq 0$ . Исходя из условий постановки задачи управления: вектор считается квазистационарным и ограниченным областью допустимых значений  $\forall \xi \in \Xi$ , и предельные значения координат состояния асинхронного электродвигателя и скорость их изменения находятся в области допустимых начальных условий:

$$\max\{x(t)\} = [\max\{\psi_{r\alpha}\} \quad \max\{\omega\}]^T = [K_\psi^{\max} \quad K_\omega^{\max}]^T \leq [\max\{\psi_{r\alpha}(0), \psi_{r\alpha}^*\} + \Delta e_\psi(0) \quad \max\{\omega(0), \omega^*\} + \Delta e_\omega(0)]^T,$$

$$\max\{p(x(t))\} = [\max\{p\psi_{r\alpha}\} \quad \max\{p\omega\}]^T = [G_{p\psi}^{\max} \quad G_{p\omega}^{\max}]^T \leq [G_{p\psi}^{\max}(0) \quad G_{p\omega}^{\max}(0)]^T, \quad (12)$$

тогда для управления (10) можно выбрать коэффициенты стабилизирующей матрицы следующего вида:

$$[\eta_\psi \quad \eta_\omega]^T \geq [\Delta a^{\max} \theta_\psi K_\psi^{\max} + \Delta a^{\max} G_{p\psi}^{\max} + b_\psi \quad (\theta_\omega + p)(\Delta c^{\max} K_\omega^{\max} + \Delta c^{\max} G_{p\omega}^{\max}) + b_\omega]^T \quad (13)$$

где  $b_\psi, b_\omega$  – бесконечно малая и положительная константа.

С учётом (13) выражение (11) примет вид  $pV_1 = -[l_\psi \quad l_\omega]^T V_1 - [b_\psi \quad b_\omega]^T s < \sqrt{2} [b_\psi \quad b_\omega]^T \sqrt{V_1}$ , что соответствует  $s = 0$ . Таким образом, для системы уравнений (6) при управлении (10) сходимость рассогласования фактической и заданной скорости вращения и потокосцепления ротора к нулю осуществляется по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\frac{1}{\theta_i}$ , при  $\theta_i > 0$ . К недостаткам этого метода следует отнести возможную потерю работоспособности системы при изменении параметрических возмущений в широких пределах, что ведёт к большому увеличению коэффициентов  $\eta$  в (10), следовательно, к большому значению управляющего воздействия, при инерционности исполнительных элементов ПП. На практике такое увеличение управления часто бывает неприемлемо, так как задача решается в условиях ограниченной энергии управления, применяемых элементов ПП, их механической прочности, предельных нагрузочных характеристик, а также исходя из конкретных условий работы. Так, токи силовых полупроводниковых элементов ограничены предельно допустимым значением, из соображений плавности работы механизмов часто бывает необходимо ограничить электромагнитный момент, ускорение ротора, или добиться плавности их изменения и т.д. Кроме того, желание упростить реализацию алгоритма управления, за счёт выбора постоянного, но достаточно большого коэффициента усиления  $\eta = [\eta_\psi \quad \eta_\omega]^T$ , приведет к большим амплитудным колебаниям системы в реальном скользящем режиме. Для расширения границ применения

алгоритмов можно использовать сигнально-параметрические алгоритмы скоростного градиента с явной эталонной моделью. Параметрическая обратная связь вводится для дополнительной стабилизации ОУ. При этом в системе достигается цель управления при широком изменении параметров ОУ и возможно возникновение скользящего режима при меньших значениях коэффициента усиления  $\eta$ . Более того, если параметрическая обратная связь строится на основе явной эталонной модели, то появляется возможность выбора поверхности скольжения исходя из параметров эталонной модели [6]. В этом случае независимо от параметров ОУ при возникновении скользящего режима система будет иметь заданную скорость сходимости (быстродействие). Но наиболее сложной задачей при построении систем с явной эталонной моделью является построение основного контура системы, обеспечивающего выполнение условия адаптируемости Эрцбергера – условие совместимости или точного соответствия модели [6,13]. Это приводит к сложной структуре системы управления асинхронного электродвигателя, как многосвязного объекта высокого порядка. Перечисленные выше особенности системы не допускают прямого использования результатов теории систем со скользящим движением. Существует иной путь, основанный на настройке поверхности скольжения. Процедура синтеза задачи управления строится в три этапа. На первом этапе в условиях полной априорной информации о номинальных параметрах объекта управления выбираем идеальное уравнение поверхностей разрыва, чтобы движение в установившемся скользящем режиме обеспечивало цель управления. На втором этапе синтезируется алгоритм настройки параметров уравнений разрыва, обеспечивающий желаемое качество при отсутствии априорной информации о параметрах объекта

управления и нагрузки. На третьем этапе строится управление, гарантирующее возникновение и существование полного скользящего режима[2].

Другой подход основан на применении эвристических алгоритмов, используя показания контрольно-измерительных приборов, опыт и моделирование, последующей разработке системы управления в виде нечетких контроллеров, которые справляются с управлением сложными объектами достаточно уверенно [3,6,7,10,15,16,18].

Формулы нечеткой логики представляют особый тип отношений (называемых нечётким(FL)-отношениями), который, в свою очередь, может приближенно выражать функции. Каждое FL-отношение отражает нечёткое причинное отношение предпосылки – *Если* и заключения – *Тогда*. Нечёткая модель нелинейной динамической системы описывается нечёткими правилами – *Если-Тогда*, которые представляют совокупность локальных l-ых линейных соотношений вход-выход. Применительно к описанию системы (6) нечёткое отношение может быть записано в виде нечёткого правила:

$$R_l : \text{Если } x_1 \text{ есть } F_1^l, \text{ и } x_n \text{ есть } F_n^l \text{ Тогда } : y^l = z^l(x_1, \dots, x_n)$$

где:  $x_1$  – лингвистические нечёткие входа ;  $y^l$  – выходная чёткая функция, в качестве которой используется полином 1 порядка следующего вида:  $z^l(x_1, \dots, x_n) = z^l(0) + \sum_{i=1}^n \theta_i^l x_i$  [10]. Эти правила формируются с использованием лингвистических терминов и базы знаний, полученных с помощью моделирования с учётом факторов чувствительности. Функции принадлежности  $\mu_{F_i^l}(x_i)$ , определённые на входных переменных нечёткого подмножества  $F_i^l, F_n^l$  применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

Преимущество этого представления в конечном множестве символов, необходимых для описания непрерывных

функции формулой нечеткой логики. Более того, это нашло бы действительное применение, если функцию аппроксимации можно было бы получить из представляющей ее формулы. Это можно сделать с помощью процедуры дефазификации [7,18]. Строго говоря, дефазификация принадлежит классу обобщенных операций, которые сопоставляют объекту множество. Специфика дефазификации в том, что она сопоставляет объекту нечеткое множество. Поэтому мы можем считать дефазификацию обобщенной нечеткой операцией на множестве элементов [7,18]:

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^m y^l \left( \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^m \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)} = \theta^T \zeta(x) = \theta \zeta(x)^T \quad (14)$$

где:  $l = 1, 2, \dots, m$  - количество нечётких логических правил,  $i = 1, 2, \dots, n$  - количество нечётких логических входов,  $\theta = [y^1, \dots, y^m]^T$  - настраиваемый параметрический вектор,  $\zeta = [\zeta^1(x), \dots, \zeta^m(x)]^T$  - регрессивный вектор. Регрессивный вектор  $\zeta$  определен как:

$$\zeta^l(x) = \frac{\prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)} \quad (15)$$

Решая проблему управления для нелинейных систем, мы задавались условием, что в (6) коэффициенты матрицы  $f(x, t), g(x, t)$  известны. В случае, если коэффициенты в функции  $f(x, t), g(x, t)$  не известны, то проблема адаптивного скользящего управления не решается. Зададимся аппроксимированной нечёткой функцией, взамен неизвестной  $f(x, t), g(x, t)$ , в виде

$$\begin{aligned} \hat{f}(x | \theta_f) &= \theta_f^T \zeta(x), \\ \hat{g}(x | \theta_g) &= \theta_g^T \zeta(x). \end{aligned} \quad (16)$$

Для исключения колебаний в системе, вызванных разрывным управляющим воздействием, и статической ошибки, заме-

ним  $\eta \operatorname{sgn}(e_i)$  нечётким PI регулятором в пределах граничного слоя  $-|s(e_i)| < \Phi$ , где:  $\Phi$  - толщина граничного слоя (рис.1). Воспользовавшись методикой (14), представим нечёткий PI регулятор ( $u_p = k_p s + k_i \int s dt$ ) выражением:

$$\hat{p}(s(e_i) | \theta_p) = \theta_p^T p(s) \quad (17)$$

где:  $\theta_p = [\theta_{k_p}, \theta_{k_i}]^T$  - настраиваемый параметрический вектор,  $p(s) = [s(e_i), \int s(e_i) dt]^T$  - регрессивный вектор. Стабилизирующая добавка  $\eta \operatorname{sgn}(e_i)$  сохраняет своё управляющее действие за пределами граничного слоя  $|s(e_i)| \geq \Phi$  (и учитывая максимальную ошибку аппроксимации  $d_{\max}$  нечёткой системы можно записать ограничение регулятора в виде  $|\hat{p}(s(e_i) | \theta_p)| = \Xi + |\eta| + d_{\max}$ , где:  $d_{\max}$  - максимальная ошибка нечёткой аппроксимации.

С учётом введённого нечёткого регулятора взамен  $u_{sw}$  и аппроксимированной нечёткой функции закон управления

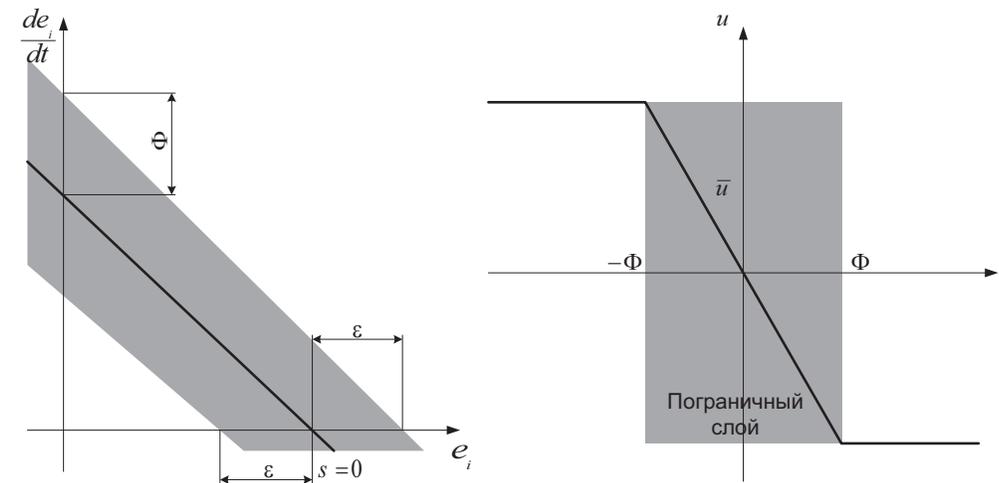


Рис.1. Пограничный слой и интерполяция управляющей функции

(10) для системы (6) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u(i_{eq\alpha} \quad i_{eq\beta}) &= \theta^{-1} \hat{g}^{-1}(x | \theta_g) \left( -l_\psi \quad l_\psi \right) s(e_\psi, e_\omega) - \theta (\hat{f}(x | \theta_f) - p x^*(t) - \hat{p}(s(e_i) | \theta_p)) \\ u &= \theta^{-1} \hat{g}^{-1}(x | \theta_g) \left( -l_s - \theta (\hat{f}(x | \theta_f) - p x^*(t) - \hat{p}(s | \theta_p)) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

**Теорема 1.**

Если для системы (6) нечёткие переменные  $\tilde{f}, \tilde{g}, \tilde{p}$  заданы параметрическими векторами  $\theta_f, \theta_g, \theta_p$ , производные которых соответствуют адаптивному закону с обучаемыми коэффициентами  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ :

$$p\theta_f = \gamma_1 s \zeta(x), p\theta_g = \gamma_2 s \zeta(x)u, p\theta_p = \gamma_3 s \mu(s), \quad (19)$$

существует знакоопределённая и положительная функция:

$$V = \frac{1}{2} s^T I s + \frac{\theta}{2\gamma_1} (\hat{\theta}_f - \theta_f)^2 + \frac{\theta}{2\gamma_2} (\hat{\theta}_g - \theta_g)^2 + \frac{1}{2\gamma_3} (\hat{\theta}_p - \theta_p)^2, \quad (20)$$

а её производная знакоопределённая и отрицательная, то обеспечивается ограниченность всех траекторий системы (6).

**Доказательство.**

Зададимся оптимальными параметрами нечёткой системы, как аргументами минимальных супремумов от ошибки нечёткой аппроксимации на множестве символов, необходимых для описания непрерывных функций и ограниченных на множестве допустимых значений  $\Omega_f, \Omega_g, \Omega_p$ :

$$\begin{aligned} \theta_f^* &= \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} \left( \sup |f(x,t) - \hat{f}(x|\theta_f)| \right), \\ \theta_g^* &= \arg \min_{\theta_g \in \Omega_g} \left( \sup |g(x,t) - \hat{g}(x|\theta_g)| \right), \\ \theta_p^* &= \arg \min_{\theta_p \in \Omega_p} \left( \sup |u_{sw} - \hat{p}(x|\theta_p)| \right). \end{aligned}$$

При этом минимально возможная ошибка аппроксимации при отсутствии неопределённостей:

$$d_{\min} = f(x,t) - \hat{f}(x|\theta_f^*) + (g(x,t) - \hat{g}(x|\theta_g^*))u.$$

Множество допустимых значений определено условиями принадлежности нечётких параметров области пространства состояния координат управления и ограниченности в пределах  $M_f, M_g, M_p$  (возможные предельные значения, заданные на этапе постановки задачи) так, что:

$$\Omega_f = \{\theta_f \in R^2 \mid |\theta_f| \leq M_f\}, \Omega_g = \{\theta_g \in R^2 \mid 0 < \varepsilon \leq |\theta_g| \leq M_g\}, \Omega_p = \{\theta_p \in R^2 \mid |\theta_p| \leq M_p\}.$$

В общем случае скользящая поверхность в n-мерном пространстве ошибки состояния задаётся в виде  $s(e_i) = c_1 e_i + c_2 p e_i + c_3 p^2 e_i + \dots + c_{n-1} p^{n-2} e_i + p^{n-1} e_i$ , где  $\underline{c} = [c_1, c_2, \dots, c_{n-1}]^T$  – коэф-

фициенты полинома Гурвица  $h(p) = p^{n-1} + c_{n-1} p^{n-2} + \dots + c_1$ ,  $p$  – полином Лапласа [13]. В частном случае для системы (6) скользящая поверхность задаётся (5). При этом производная от  $ps$  (8) с учётом (15,16,17,18) примет вид:

$$\begin{aligned} ps &= p\xi + \theta(\theta_\psi, \theta_\omega) (f(x,t) + g(x,t)u + \xi - p x^*(t)) = \\ p\xi + \theta\xi + \theta(f(x,t) - \hat{f}(x|\theta_f)) + \theta(g(x,t) - \hat{g}(x|\theta_g))u - Is - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p) + \theta(d_{\min} - d_{\min}) &= \\ p\xi + \theta\xi + \theta(f(x,t) - \hat{f}(x|\theta_f)) + \theta(g(x,t) - \hat{g}(x|\theta_g))u - Is - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p) - & \\ \theta(f(x,t) - \hat{f}(x|\theta_f^*)) + (g(x,t) - \hat{g}(x|\theta_g^*))u + \theta d_{\min} = & \\ p\xi + \theta\xi + \theta(\hat{f}(x|\theta_f^*) - \hat{f}(x|\theta_f)) + \theta(\hat{g}(x|\theta_g^*) - \hat{g}(x|\theta_g))u - Is - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p) + \theta d_{\min} &= \\ p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} + \theta(\hat{f}(x|\theta_f^*) - \hat{f}(x|\theta_f)) + \theta(\hat{g}(x|\theta_g^*) - \hat{g}(x|\theta_g))u - Is - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p) + & \\ (\hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p)) = & \\ p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} + \theta(\hat{f}(x|\theta_f^*) - \hat{f}(x|\theta_f)) + \theta(\hat{g}(x|\theta_g^*) - \hat{g}(x|\theta_g))u - Is - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p) + & \\ (\hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p)) = & \\ p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} - Is + \theta \left( (\theta_f^{T*} - \theta_f^T) \zeta(x) \right) + \theta \left( (\theta_g^{T*} - \theta_g^T) \zeta(x) \right) u + \left( \theta_p^{T*} - \theta_p^T \right) \mu(s) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*) &= \\ p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} - Is + \theta \left( (\theta_f^{T*} - \theta_f^T) \zeta(x) \right) + \theta \left( (\theta_g^{T*} - \theta_g^T) \zeta(x) \right) u + \left( \theta_p^{T*} - \theta_p^T \right) \mu(s) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*) &= \\ p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} - Is + \theta \phi_f \zeta(x) + \theta \phi_g \zeta(x) u + \phi_p \mu(s) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*). & \quad (21). \end{aligned}$$

Взяв производную по времени от квадратичной функции (19), играющей роль отклонения траектории от поверхности скольжения:

$$pV = s^T ps + \frac{\theta}{\gamma_1} \phi_f^T p \phi_f^T + \frac{\theta}{\gamma_2} \phi_g^T p \phi_g^T + \frac{1}{\gamma_3} \phi_p^T p \phi_p^T,$$

и используя полученное выражение (20), получим:

$$pV = s^T (p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min} - Is + \theta \phi_f \zeta(x) + \theta \phi_g \zeta(x)u + \phi_p \mu(s) - \hat{p}(s(e_i)|\theta_p^*)) + \frac{\theta}{\gamma_1} \phi_f^T p \phi_f^T +$$

$$\frac{\theta}{\gamma_2} \phi_g^T p \phi_g^T + \frac{1}{\gamma_3} \phi_p^T p \phi_p^T =$$

$$s^T (p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min}) - s^T Is + \frac{\theta}{\gamma_1} \phi_f^T (\gamma_1 s \zeta(x) + p \phi_f^T) + \frac{\theta}{\gamma_2} \phi_g^T (\gamma_2 s \zeta(x)u + p \phi_g^T) +$$

$$\frac{1}{\gamma_3} \phi_p^T (\gamma_3 s \mu(s) + p \phi_p^T) - s^T \hat{p}(s|\theta_p^*) =$$

$$s^T (p\xi + \theta\xi + \theta d_{\min}) - s^T Is + \frac{\theta}{\gamma_1} \phi_f^T (\gamma_1 s \zeta(x) + p \phi_f^T) + \frac{\theta}{\gamma_2} \phi_g^T (\gamma_2 s \zeta(x)u + p \phi_g^T) +$$

$$\frac{1}{\gamma_2} \phi_p (\gamma_3 s \mu(s) + p \phi_p^T) - s^T \hat{\rho}(s | \theta_p) \leq$$

$$s^T (p \xi + \theta \xi + \theta d_{\min}) - s^T l s + \frac{\theta}{\gamma_1} \phi_f (\gamma_1 s \zeta(x) + p \phi_f^T) + \frac{\theta}{\gamma_2} \phi_g (\gamma_2 s \zeta(x) u + p \phi_g^T) +$$

$$\frac{1}{\gamma_2} \phi_p (\gamma_3 s \mu(s) + p \phi_p^T) - s^T (\Xi + |\eta| + d_{\max}) \text{sign}(s).$$

Выбирая  $p \phi_f^T = -p \theta_f^T$ ,  $p \phi_g^T = -p \theta_g^T$ ,  $p \phi_p^T = -p \theta_p^T$ ,  $0 < \theta < 1$ , получим, что:

$$pV \leq -s^T l s + s^T (p \xi + \theta \xi + \theta d_{\min}) - s^T (\Xi + |\eta| + d_{\max}) \text{sign}(s).$$

Задавая коэффициенты  $l_\psi > 0$ ,  $l_\omega > 0$  стабилизирующей матрицы  $l$ ,  $|\eta| \geq |\Xi + d_{\max}|$  функция Ляпунова (20) положительно-определённая, то её производная отрицательно определена. Таким образом, все траектории системы (6),(18) ограничены. Следовательно, если  $\epsilon(0)$  в (5) ограничено, то  $\epsilon(t)$  имеет конечный предел на всём промежутке  $t$ , а желаемая  $x^*(\psi, \omega, t)$  ограничена конечным значением на этапе постановки задачи, то и траектории движения координаты состояния  $x(\psi, \omega, t)$  ограничены. Обобщая проведённый анализ, представим пошаговый алгоритм адаптивного нечёткого скользящего режима управления асинхронного электродвигателя в виде блок-схемы, представленной на рис. 2.

Для подтверждения изложенных теоретических положений, проведено математическое моделирование системы управления асинхронным электродвигателем 5AM112M4 с использованием интерактивной среды MATLAB и пакета нечёткой логики Fuzzy Logic Toolbox. На базе полученных теоретических положений, разработана математическая модель адаптивного нечёткого управления асинхронным электроприводом заданной нечёткой нелинейной динамической системой. Предварительно проводится синтез адаптивного скользящего режима управления и выбор параметров пропорционально-интегрального регулятора для невозмущённой динамической системы (6) в области  $|s(e_i)| < \Phi$ . Начальные значения параметрического вектора в (17)  $\theta_p(0) = [4 \ 0.001]^T$  соответствуют коэффициентам PI регулятора скорости, рассчитанные для идеальной динамической системы. Нечёткая модель нелинейной дина-



Рис. 2. Блок-схема алгоритма адаптивного нечёткого управления.

мической системы формируется нечёткими правилами – Если-тогда, которые представляют совокупность локальных  $l$ -ых линейных соотношений вход-выход, которые разрабатываются с использованием лингвистических терминов и базы знаний, полученных с помощью моделирования с учётом факторов чувствительности.

Функции принадлежности  $\mu_{F_\omega^l}(x_\omega)$ ,  $\mu_{F_\psi^l}(x_\psi)$ , определённые на входных переменных нечёткого подмножества  $F_\omega^l$ ,  $F_\psi^l$ , применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила. Выбирается коэффициент  $\theta_\psi$ ,  $\theta_\omega$  в (5) для желаемой поверхности скольжения. Конструируется закон управления (18) на базе адаптивного управления (19) с обучаемыми коэффициентами  $\gamma_1(0)$ ,  $\gamma_2(0)$ ,  $\gamma_3(0)$  для невозмущённой системы и удовлетворяющей условию (13).

Каждая из аппроксимированных функций в (17) имеет два входа: координату состояния скорости ротора и потокосцепления ротора и их производные на  $i$ -линейном участке. Для каждого входа в области допустимых рассуждений используются Гауссовы функции принадлежности, которые описываются следующими уравнениями:

$$\mu_z(x) = e^{-x^2/c^2/\lambda}, \mu_N(x) = \begin{cases} 1 - \mu_Z(x), & \text{при } x \leq 0 \\ 0, & \text{при } x > 0 \end{cases}, \mu_P(x) = \begin{cases} 1 - \mu_Z(x), & \text{при } x \geq 0 \\ 0, & \text{при } x < 0 \end{cases} \quad (22)$$

Регрессивный вектор выходной переменной определяется центроидным методом для Гауссовых функций принадлежности в допустимой области относительных единиц изменения скорости и потокосцепления ротора [-1,1] и [-1.2,1.2], соответственно. Каждый из адаптивных аппроксиматоров (17) в нечёткой системе строится с использованием набора девяти правил в следующей форме:

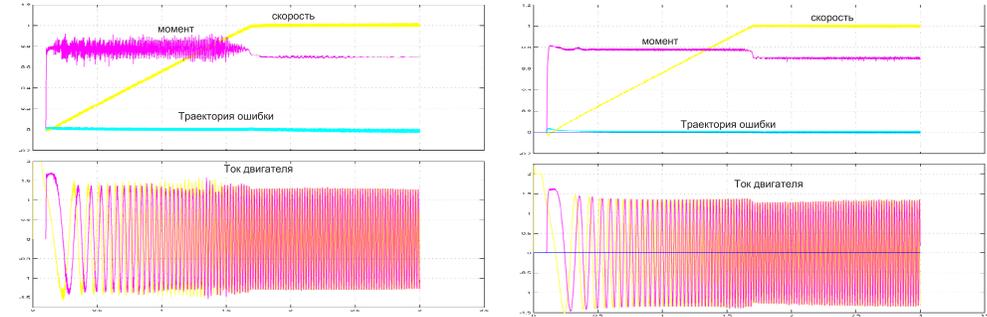
$R_l$ : Если  $\omega$  есть  $F_\omega^l$  и  $\psi$  есть  $F_\psi^l$ , тогда  $y^l = \theta_{\omega}^l \omega + \theta_{\psi}^l \psi \quad \forall l = 1, 2, \dots, m$

где:  $F_\omega^l, F_\psi^l$  – нечёткие переменные имеющие функции принадлежности  $\mu_{F_\omega^l}(x_\omega), \mu_{F_\psi^l}(x_\psi), \mu_{F_y^l}(y)$  и определённые на  $x(\omega, \psi), \forall l = 1, 2, \dots, m$  – набор правил – Если-тогда,  $y^l$  – линейная функция из  $l$ -го правила Если-тогда,  $a_l \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ . Отсюда аппроксимированные функции  $\hat{f}(x | \theta_f), \hat{g}(x | \theta_g)$  нелинейной динамической системы определяются выражениями (14), (15), где:  $\zeta = \zeta_f = \zeta_g = [y^1 \zeta^1(x), \dots, y^m \zeta^m(x)]^T$ ,  $\theta_g = [\theta_{g,\omega}^1, \dots, \theta_{g,\omega}^m, \theta_{g,\psi}^1, \dots, \theta_{g,\psi}^m]^T$ ,  $\theta_f = [\theta_{f,\omega}^1, \dots, \theta_{f,\omega}^m, \theta_{f,\psi}^1, \dots, \theta_{f,\psi}^m]^T$  – параметрические вектора, которые модернизируются в соответствие с адаптивным законом (19).

Конструируется управляющий закон в виде (18) в пределах граничного слоя, с использованием набора 27 нечётких правил:

$R_l$ : Если  $e_i$  есть  $F_{e_i}^l$  и  $pe_i$  есть  $F_{pe_i}^l$  и  $\int e_i$  есть  $F_{\int e_i}^l$ , тогда  $z_i^l = \theta_{k_p,i}^l s_i + \theta_{k_i,i}^l \int s_i, \forall l = 1, 2, \dots, m$

где:  $e_i$  – ошибка системы,  $pe_i$  – ускорение,  $\int e_i$  интеграл ошибки системы с учётом времени квантования 20 мкс, управляющее воздействие на объект  $\rho^l, F_{e_i}^l, F_{pe_i}^l, F_{\int e_i}^l$  – нечёткие переменные имеющие Гауссовы функции принадлежности (21)  $\mu_{F_{e_i}^l}(e_i), \mu_{F_{pe_i}^l}(pe_i), \mu_{F_{\int e_i}^l}(\int e_i)$  и определённые на  $x(\omega, \psi), \forall l = 1, 2, \dots, m$  – набор правил. Тогда адаптивный PI регулятор определяется соотношением где:  $\rho_i = [z_i^1 \rho_i^1(s_i, \int s_i), \dots, z_i^m \rho_i^m(s_i, \int s_i)]^T$ ,  $\theta_{k_p} = [\theta_{k_p,\omega}^1, \dots, \theta_{k_p,\omega}^m, \theta_{k_p,\psi}^1, \dots, \theta_{k_p,\psi}^m]^T$ ,  $\theta_{k_i} = [\theta_{k_i,\omega}^1, \dots, \theta_{k_i,\omega}^m, \theta_{k_i,\psi}^1, \dots, \theta_{k_i,\psi}^m]^T$ . Параметрический настраиваемый вектор  $\theta_p = [\theta_{k_p}, \theta_{k_i}]^T$  корректируется согласно адаптивному закону управления (19). В соответствие с (18) строится результирующий закон управления асинхронным электродвигателем и производится корректировка  $\theta_f, \theta_g, \theta_p$  для следующего цикла расчёта управления.



а) SMC  
б) FSMC  
Рис. 3. Результаты моделирования режимов управления

В качестве аналитического метода определения показателей качества системы автоматического регулирования, использована квадратичная интегральная оценка [10]:  $I = \int_{-\infty}^{+\infty} e_i^2(t) dt$ . Для нечёткого адаптивного управления асинхронным электродвигателем FSMC, при его работе на холостом ходу и при возмущениях заданных в виде 40% отклонения от номинального значения активного сопротивления статора и 50% отклонения от постоянной времени ротора, квадратичная интегральная оценка  $I$  качества системы составила 6.195. При нагрузке 0.7 от номинального тока для анализируемого двигателя и аналогичных отклонениях от номинальных параметров двигателя квадратичная интегральная оценка  $I$  составила 9.031 (рис.3, б). Для адаптивного скользящего режима управления SMC при нагрузке 0,7 от номинального тока и отклонениях параметров асинхронного электродвигателя (рис.3,а), аналогичных для адаптивного нечёткого скользящего режима управления, квадратичная интегральная оценка  $I$  составила 17.031.

Адаптивный нечёткий скользящий режим управления асинхронным электродвигателем с неточно известными параметрами и при произвольно изменяющейся нагрузке позволяет обеспечить желательные характеристики регулирования, инвариантность к параметрическим возмущениям и изменениям нагрузочных характеристик, исключить амплитудные колебания в скользящей системе управления асинхронного электропривода.

## Литература:

1. Вишневецкий В.И., Лазарев С.А., Митюков П.В. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода/Вестник чувашского университета, 2010. №3.
2. Вишневецкий В.И. Адаптивный скользящий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя/Вестник чувашского университета, 2011, №3.
3. Гостев В.И. Проектирование нечётких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ – Петербург, 2011.
4. Ла-Салль Ж., Левшец С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова. Л.: Мир, 1964. 168 с.
5. Ляпунов Л.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.
6. Методы робастного нейро-нечёткого и адаптивного управления/ Под редакцией Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 744 с.
7. Мочкорж И., Новак В., Перфильева И. М. Математические принципы нечёткой логики. М.: Физматлит, 2006.
8. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронный электропривод с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: ИЦ «Академия», 2006, 272 с.
10. Усков А.А., Кузьмин В.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. М.: Горячая линия – Телеком, 2004.
11. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
12. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью.-М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.
13. Applied nonlinear control / Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li . Prentice-Hall Inc, 1991.
14. Eun, Y., Kim, J., Kim, K., and Cho, D. Discrete-time Variable Structure Controller with a Decoupled Disturbance Compensator and Its Application to a CNC Servomechanism/ IEEE Trans. Control Syst. Technol., 1999, №4.
15. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach/ Kazuo Tanaka, Hua O. Wang. John Wiley & Sons, Inc. 2001.
16. Fuzzy control/ Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich . Addison Wesley Longman, Inc. 1998.
17. Utkin V.I. Sliding Mode Control Design Principle sand Application to Electric Drives/ V.I.Utkin.// IEEE Trans. Ind. Electronics, 1993. Vol. 40, №1. P. 23-26.
18. Wang L.X. A Course in Fuzzy System and Control, Prentice Hall, 1997.
19. Yan Z., Jin C., Utkin V.I. Sensorless sliding-mode control of induction motors// IEEE Trans. Ind. Electron, 2000. Vol. 47. P. 1286–1297.

## Сведения об авторах



**Вишневецкий Владимир Ильич**  
 Инженер, заместитель заведующего отделом электропривода ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары.  
 E-mail: vishnevskiy-v@ekra.ru.  
 Vishnevskiy Vladimir I. – engineer, deputy chief in department of motor control systems «EKRA» SPC Ltd., Russia, Cheboksary.

УДК.004.4.XML

Сергеев А.В.

## МЕТОДЫ XML-СЕРИАЛИЗАЦИИ

**Аннотация:** в последние годы язык XML стал отраслевым стандартом в области обмена данными между бизнес-системами, что делает его применение в новых проектах чуть ли не обязательным. Статья рассматривает методы работы с XML-документами. Приводится оценка скорости работы методов, а также оценка трудозатрат при использовании того или иного метода. Цель статьи – выявить быстрый и простой в реализации метод XML-сериализации.

**Ключевые слова:** XML, сериализация, DOM, XSLT, мнемосхема, Web-интерфейс, dotNET.

## Введение

XML[1] – рекомендованный Консорциумом Всемирной паутины(W3C) язык разметки, фактически представляющий собой свод общих синтаксических правил. XML – текстовый формат, предназначенный для хранения структурированных данных, для обмена информацией между программами, а также для создания на его основе более специализированных языков разметки. «Текстовость» формата делает его человеко-ориентированным, а стандартизованность делает возможным обработку компьютером.

Сериализация (в программировании) – процесс перевода какой-либо структуры данных в последовательность битов. Обратной к операции сериализации является операция десериализации – восстановление начального состояния структуры данных из битовой последовательности.

По аналогии, XML-сериализация – процесс перевода какой-

либо структуры данных в XML-формат, XML-десериализация – процесс перевода XML-документа в структуру.

Определим классы, которые будут использованы в примерах. Пусть они описывают устройство. Переменные устройства разделены по группам, причем группы могут быть любой вложенности. Группы содержат переменные: дискретные и/или аналоговые. Переменные содержат некоторые атрибуты, например идентификатор и имя. Переменные могут не принадлежать ни одной группе.

Здесь можно выделить ряд сущностей: Устройство, Группа, ДискретнаяПеременная, АналоговаяПеременная. Приведем псевдоописание сущностей.

```

Устройство : class {
    Группы: массив из Групп;
    Переменные: массив дискретных и/или аналоговых переменных;
}
Группа : class {
    Группы: массив из Групп;
    Переменные: массив дискретных и/или аналоговых переменных;
}
ДискретнаяПеременная : class {
    Идентификатор : целое;
    Имя : строка;
}
ВещественнаяПеременная : class {
    Идентификатор: целое;
    Имя : строка;
}

```

На языке C# описание этих классов будет таким:

```

public class Group {
    private List<Group> _groups = new List<Group>();
    public List<Group> Groups {
        get { return _groups; }
    }
    private List<VariableBase> _vars = new List<VariableBase>();
    public List<VariableBase> Vars {
        get { return _vars; }
        set { _vars = value; }
    }
}
public Group() {}
}
public class Device : Group {
    public Device() {}
}
public abstract class VariableBase {
    private int _id;

```

```

public int ID {
    get { return _id; }
    set { _id = value; }
}
private string _name;
public string Name {
    get { return _name; }
    set { _name = value; }
}
protected VariableBase() {}
}
public class DiscreteVariable: VariableBase {
    public DiscreteVariable() {}
}
public class AnalogVariable: VariableBase {
    public AnalogVariable() {}
}
}

```

### Способы работы с XML

В большинстве языков программирования существует два способа работы с XML: DOM[2] и потоковый.

DOM(Document Object Model)] – довольно гибкий интерфейс, предоставляющий возможность доступа и обработки XML-документов. Представляет документ древовидной структурой с элементами, атрибутами. Позволяет загрузить XML-документ целиком, легко вносить в него изменения, сохранять.

Плюсы:

- легкость внесения изменений;
- стандартизован консорциумом W3C.

Минусы:

- медленный. Загрузка файла размером 3 Мб даже на современных компьютерах может занимать более 3 секунд;
- неудобен при работе с большими файлами. Поскольку DOM строит дерево всего документа, он потребляет много ресурсов памяти и времени процессора

Потоковый способ, как ясно из названия, предоставляет последовательный, однонаправленный доступ к данным документа.

**Плюсы:**

- быстрый;
- удобен при работе с большими файлами;

**Минусы:**

- невозможно вносить изменения «на лету».

**Типовая XML-сериализация**

Очевидно, что XML-сериализация объекта класса Device заключается в реализации метода `Serialize` в каждом классе, который выполнит все действия, необходимые для сериализации самого себя, а также вызовет данный метод для всех дочерних узлов.

Далее приводится код сериализации классов, использующий DOM.

```
public class Group {
    ...
    protected void SerializeChildGroups(XmlNode node) {
        for (int i=0;i<_groups.Count;i++)
            node.Childs.Add(_groups[i].Serialize(node.OwnerDocument));
    }
    protected void SerializeChildVars(XmlNode node) {
        for (int i=0;i<_vars.Count;i++)
            node.Childs.Add(_vars[i].Serialize(node.OwnerDocument));
    }
    public virtual XmlNode Serialize(XmlDocument doc) {
        XmlElement result = doc.CreateElement(«Группа»);
        SerializeChildGroups(result);
        SerializeChildVars(result);
        return result;
    }
}
public class Device {
    ...
    public override XmlNode Serialize(XmlDocument doc) {
        XmlElement result = doc.CreateElement(«Устройство»);
        SerializeChildGroups(result);
        SerializeChildVars(result);
        return result;
    }
}
public class DiscreteVariable {
    ...
    public virtual XmlNode Serialize(XmlDocument doc) {
        XmlElement result = doc.CreateElement(«ДискретнаяПеременная»);
        result.Attributes.Add(«Идентификатор», ID.ToString());
        result.Attributes.Add(«Имя», Name);
        return result;
    }
}
public class AnalogVariable {
```

```
...
public virtual XmlNode Serialize(XmlDocument doc) {
    XmlElement result = doc.CreateElement(«АналоговаяПеременная»);
    result.Attributes.Add(«Идентификатор», ID.ToString());
    result.Attributes.Add(«Имя», Name);
    return result;
}
}
```

При восстановлении свойств и членов классов необходимо учитывать отсутствие атрибутов и/или элементов в исходном XML-документе. В данном случае свойства и поля должны заполняться значениями по умолчанию.

Для сокращения размера статьи код десериализации здесь не приводится.

Потоковый метод выгодно отличается от DOM тем, что документ не загружается полностью и не занимает место в памяти. Кроме того, десериализация большого XML-документа через DOM занимает много времени (~1Мб/с), что в большинстве случаев сказывается на удобстве работы пользователя. Основная идея, как и в предыдущем методе, заключается в реализации метода `Serialize`.

Для сокращения размера статьи код потокового метода здесь не приводится.

Оценим трудозатраты на добавление дополнительного свойства, например, в «Функция»:

1. Добавить свойство `Fun` в класс `VariableBase`;
2. Добавить код сериализации свойства `Fun`;
3. Протестировать метод сериализации;
4. Добавить код десериализации свойства `Fun`;
5. Протестировать метод десериализации.

При этом в большинстве случаев происходит дублирование кода, что влечет за собой разрастание проекта, затруднение масштабируемости и повторного использования.

Рассмотрим еще один способ XML-сериализации, лишенный всех этих недостатков.

## XML-сериализация в .NET

.NET Framework содержит классы, которые избавляют программиста от написания большого количества рутинного кода, поскольку сериализация базовых типов происходит автоматически, а сериализацией сложных типов можно управлять. Также программисту предоставляется возможность самостоятельно реализовать сериализацию, хотя в большинстве случаев это не является необходимостью.

Классы для работы находятся в пространстве имен System.Xml.Serialization. Давайте рассмотрим его поближе[3].

XmlSerializer – класс, выполняющий основные действия, т.е. непосредственно сериализацию и десериализацию. В конструктор необходимо передать тип сериализуемого класса, после чего среда основываясь на метаданных и структуре класса создаст сборку, выполняющую сериализацию/десериализацию конкретного типа, которая будет загружена в память. Очевидны плюсы и минусы данного подхода.

Плюсы:

- большая скорость, сравнимая с потоковым методом, при выполнении основных операций;
- возможность чтения больших файлов.

Минусы:

- большое время создания объекта XmlSerializer.

Как уже было сказано, среда использует метаданные, что дает нам возможность контролировать процесс, например поменять имя или тип элемента/атрибута, изменить пространство имен. Также существует возможность отменить сериализацию полей и членов объектов. Метаданные добавляются при помощи атрибутов[4].

XmlAttribute – используется для задания параметров сериализации типа по умолчанию.

XmlElementAttribute – объект, помеченный данным атрибутом, будет сериализован в XML-элемент.

XmlAttributeAttribute – объект, помеченный данным атрибутом, будет сериализован в XML-атрибут.

XmlArrayAttribute – используется при сериализации массивов.

XmlElementAttribute – используется при сериализации элементов массивов.

XmlIgnoreAttribute – используется для исключения члена или поля из процесса сериализации.

XmlAnyAttribute – используется при сериализации заранее неизвестных атрибутов.

XmlAnyElementAttribute – используется при сериализации заранее неизвестных элементов.

XmlAttribute – используется при сериализации членов перечисляемого типа.

XmlAttribute – объект, помеченный данным атрибутом, будет сериализован в XML-текст.

XmlAttribute – класс следует включать в ходе создания схем (чтобы они были распознаны в процессе сериализации).

Перейдем от теории к практике. Добавим метаданные к определениям классов и их свойствам.

```
public class Group {
    private List<Group> _groups = new List<Group>();
    [XmlElement(«Группа»)]
    public List<Group> Groups {
        get { return _groups; }
    }
    private List<VariableBase> _vars = new List<VariableBase>();
    [XmlElement(«ДискретнаяПеременная»,Type=typeof(DiscreteVariable))]
    [XmlElement(«АналоговаяПеременная»,Type=typeof(AnalogVariable))]
    public List<VariableBase> Vars {
        get { return _vars; }
        set { _vars = value; }
    }
}
public Group() {}
}
[XmlRoot(«Устройство»)]
public class Device : Group {
    public Device() {}
}
```

```

}
public abstract class VariableBase {
    private int _id;
    [XmlAttribute(«Идентификатор»)]
    public int ID {
        get { return _id; }
        set {_id = value; }
    }
    private string _name;
    [XmlAttribute(«Имя»)]
    public string Name {
        get { return _name; }
        set {_name = value; }
    }
    protected VariableBase() {}
}
public class DiscreteVariable: VariableBase {
    public DiscreteVariable() {}
}
public class AnalogVariable: VariableBase {
    public AnalogVariable() {}
}

XmlSerializer ser = new XmlSerializer(typeof(Device)); // создание сериализатора
ser.Serialize(outstream, device); // сериализация
dev = (Device)ser.Deserialize(instream); // десериализация

```

Как видим, описание классов несущественно изменилось, а сама процедура сериализации сократилась до двух строк кода.

Объект «Устройство», содержащий две «Группы», каждая из которых содержит по «Переменной», будет сериализован в XML-документ вида:

```

<?xml version="1.0"?>
<Устройство>
  <Группа>
    <ДискретнаяПеременная Идентификатор="0" />
  </Группа>
  <Группа>
    <АналоговаяПеременная Идентификатор="1" />
  </Группа>
</Устройство>

```

Оценим трудозатраты на добавление одного атрибута, например «Функция»:

1. Добавить свойство Fun в класс VariableBase;
2. Добавить метаданные свойству Fun.

Очевидно, что данный метод имеет преимущество по сравнению с ранее рассмотренным.

## Условия сериализуемости классов

Автоматическая сериализация накладывает некоторые несущественные ограничения на код.

1. Класс должен быть открытым.
2. Хотя бы один конструктор класса должен быть открытым и без параметров.
3. Сериализуемые свойства должны быть открытыми и иметь как аксессор, так и мутатор.
4. Сериализуемые свойства-массивы могут не иметь мутатор.
5. Сериализуемые члены должны быть открытыми.

## Область применения XML-сериализации

В настоящее время сложно найти область, в которой нельзя было бы применить XML-сериализацию, начиная с простого хранения настроек программы и заканчивая передачей параметров в Web-сервисы, начиная форматами файлов и заканчивая генерацией отчетов. Все это достигается гибкостью и расширяемостью XML-форматов. Все больше фирм, разрабатывая новые форматы документов, используют XML, например документы Open Office или Microsoft Office.

Формат XML имеет некоторые преимущества по сравнению с бинарными форматами, например обладает хорошей расширяемостью, за счет того что является текстовым форматом. Кроме того, при правильном проектировании XML может обеспечить совместимость «снизу-вверх», когда новые версии документов могут быть обработаны старыми версиями программного обеспечения. Это избавляет программиста от проблем совместимости версий. В то же время формат имеет преимущества перед текстовыми за счет того, что стандартизован и большинство языков высокого уровня имеют средства для работы с ним. Формат постоянно дополняется и обрывает новыми расширениями, такими как XSLT, XPath, XQuery, XSL-

FO, которые также развиваются и стандартизируются. Конечно же, сказав о достоинствах, нельзя не сказать о недостатках. Документы в формате XML в большинстве случаев занимают больше места по сравнению с бинарными и специализированными текстовыми форматами.

Перечислим области, в которых применяется XML-формат:

1. Настройки программного обеспечения.
2. Форматы конфигурационных файлов (переменные, уставки, команды).
3. Форматы мнемосхем АСУ ТП.
4. Генерация Web-интерфейса АСУ ТП.

### Заключение

Распространенность и гибкость XML делает его привлекательным для использования в проектах в качестве хранилища состояния бизнес-объектов, генерации отчетов, применении в Web-интерфейсах. Использование стандартных инструментов обработки XML таких как сериализация и XSL-преобразования повышают производительность программиста, избавляя его от рутинной работы. В статье были рассмотрены методы XML-сериализации. Выявлен быстрый и простой в реализации метод, сочетающий в себе преимущества всех методов.

### Литература

1. Спецификация XML // <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/>
2. Спецификация DOM // <http://www.w3.org/TR/REC-DOM-Level-1/>
3. Introducing XML Serialization // [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/182eeyhh\(v=vs.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/182eeyhh(v=vs.90).aspx)
4. Controlling XML Serialization Using Attributes // [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/2baksw0z\(v=vs.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/2baksw0z(v=vs.90).aspx)
5. Examples of XML Serialization // [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/2baksw0z\(v=vs.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/2baksw0z(v=vs.90).aspx)

### Сведения об авторах



**Сергеев Алексей Владимирович**

*Дата рождения: 09.03.1982 г.,*

*Окончил в 2005 г. ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им.*

*И.Н. Ульянова», кафедра вычислительной техники, специализация «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».*

*Заместитель заведующего отделом систем автоматизации.*

*Научное издание*

**Цифровая электротехника:  
проблемы и достижения**

Сборник научных статей  
Выпуск 1

**Отв. за выпуск В.М. Шевцов, Н.А. Иванова**  
**Дизайн и верстка И.Ю. Качанова**

Отпечатано в типографии «НН ПРЕСС»,  
428022, РФ, Чувашская Республика, г. Чебоксары,  
пр-д Машиностроителей, д. 1с

