

2. Адаптивные системы управления могут формироваться на базе упрощенных расчетных схем, получаемых по методике ярусного эквивалентирования.

3. Источником информации о параметрах текущих режимов энергосистемы являются локальные системы «Оценивания состояния», которые должны работать с наблюдаемыми фрагментами, соответствующими упрощенным расчетным схемам.

4. Адаптивные системы, основанные на упрощенных расчетных схемах энергосистем, позволяют существенно сократить объемы используемой информации и за счет уменьшения числа телеизмерений снизить расходы на их создание.

5. Оптимизацию режима энергосистемы в текущих режимах можно проводить с помощью трансформаторов с РПН, управляемых адаптивными системами управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев Д. Б., Илюшин В.И., Кочкин В.И. и др. Применение адаптивной модели энергосистемы для управления источниками реактивной мощности. — Электричество, 2011, № 2.
2. Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. — М.: Энергоиздат, 1990.
3. Гамм А.З. и др. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы. — Электричество, 2009, № 6.

* * *

Измерение токов и напряжений на высоком потенциале с помощью цифровых датчиков

ШУЛЬГА Р.Н., ЗМИЕВА К.А., ДОЛЖИКОВА Е.Ю., ТИМОФЕЕВ Е.М.

Приведено описание устройства цифрового датчика тока и напряжения 110 кВ оригинальной конструкции, в котором используются катушки Роговского и встроенный в опорный изолятор R–C-делитель напряжения. Оцифровка измерений осуществляется на высоком потенциале, преобразуется в световой сигнал и с помощью оптоволокна передается на низкий потенциал, где обрабатывается, запоминается и выдается потребителям в соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2LE.

Ключевые слова: датчик тока, датчик напряжения, аналого-цифровой преобразователь, оптоволокно, потенциал

Существующие измерительные трансформаторы тока и напряжения (ТТ и ТН) электромагнитного типа на классы напряжения 110–750 кВ имеют значительную материалоемкость, высокие массогабаритные показатели, сложную технологию, требуют больших трудозатрат в производстве. Указанные трансформаторы с бумажно-масляной и элегазовой

4. Крумм Л.А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. — Новосибирск: Наука, 1977.

5. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем/Под ред. Л.А. Крумма, А.З. Гамма. — Новосибирск: Наука, 1987.

6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1985.

7. Фролов В.И. Упрощение схем электрических сетей энергосистем для расчетов установившихся режимов с локальными возмущениями. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, № 4.

8. Дмитренко Е.М., Морозов И.В., Фролов В.И. О методике формирования расчетной схемы электрической сети Мосэнерго с контролируемой погрешностью. — Электрические станции, 2004, № 5.

[23.05.12]

Автор: Фролов Вячеслав Иванович окончил факультет «Тепловые и гидравлические машины» МВТУ им. Баумана в 1959 г. и механико-математический факультет МГУ им. Ломоносова в 1969 г. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию «Применение теории аналитических оператор-функций для исследования устойчивости и качества одного класса сложных автоматически регулируемых систем» в Ленинградском политехническом институте. Ведущий научный сотрудник «НТЦ ФСК ЕЭС».

An original design of a 110-kV digital current and voltage sensor is described, which is made using Rogovski loops and an R-C voltage divider built into the support insulator. The measured parameters are digitized at the high-voltage side, after which they are converted into a network signal, which is then transmitted to a low-voltage potential, where it is processed, saved and produced to users in accordance with the IEC 61850-9-2LE standard.

Key words: digital current and voltage sensor, analog-to-digital converter, optic fiber, voltage potentials

изоляцией являются пожаро- и взрывоопасными. Аварии в энергосистемах мегаполисов и других регионов показали, что взрывы и пожары ТТ приводят к значительному ущербу и длительным недоотпускам электроэнергии. Например, взрыв ТТ на п/ст Чагино в Москве в мае 2005 г. привел к системной аварии с ущербом свыше 2,2 млрд руб.

Разработка цифровых датчиков тока и напряжения (ЦДТН) снимает указанные недостатки и предусматривает применение микропроцессорной техники, осуществляющей оцифровку данных измерений, передачу их по оптоволокну на потенциал земли, обработку сигналов и передачу информации в соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2LE.

При финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации специалисты НИУ «МЭИ» и ФГУП ВЭИ совместно выполнили разработку и изготовление цифрового датчика тока и напряжения ЦДТН, входящего в состав комплекса электрооборудования (КЭО), предназначенного для повышения надежности и грозупорности воздушных линий и подстанций распределительных сетей 6–110 кВ.

Согласно [1–3] и стандарту МЭК 61850-9-2LE разработанный ЦДТН обладает следующими техническими характеристиками:

Номинальный первичный ток	1,0 кА
Номинальное первичное напряжение	110/ $\sqrt{3}$ кВ
Номинальная предельная кратность тока	5
Класс точности тракта тока для защиты	5P
Класс точности тракта напряжения	0,2
Частота переменного тока сети	50 Гц
Выдерживаемое напряжение полных грозовых импульсов	450 кВ
Выдерживаемое одноминутное переменное напряжение	230 кВ
Трехсекундный ток термической стойкости	20 кА
Ток электродинамической стойкости	50 кА
ЭМС	В соответствии с ГОСТ Р 51317.6.5-2006

Структурная электрическая схема ЦДТН изображена на рис. 1.

Функционально ЦДТН состоит из трех основных узлов: измерительного модуля (ИМ) на высоком потенциале шинпровода (рис. 2); опорного изолятора (ОИ); коммуникационного модуля (КМ) на потенциале земли.

Измерительный модуль изображен на рис. 2.

В качестве датчиков тока используются катушки Роговского (КР) [4], которые выполняются для цепей защиты (класс точности 5P). Применяется КР на печатных платах, позволяющая получить необходимый коэффициент преобразования:

$$K = U_2 / I_1, \quad (1)$$

где U_2 – выходное напряжение КР; I_1 – измеряемый первичный ток.

Для повышения помехоустойчивости КР размещаются в экранах; повышение точности достигается применением прецизионного оборудования и калибровкой КР на стенде.

Токовая погрешность для КР определяется формулой:

$$F_m = 100(U_2 / K - I_1) / I_1, \quad \% \quad (2)$$

Угловая погрешность, определяемая фазовым сдвигом d между первой гармоникой тока и выходного напряжения за вычетом угла, равного 90° , равна ± 60 (при токе 1 кА).

Полная погрешность (%)

$$\epsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\int_0^T (1/T) \dot{U}_2 / K_{\text{ном}} - i_1)^2 dt}, \quad (3)$$

где I_1 , i_1 – действующее и мгновенное значения первичного тока соответственно; U_2 – мгновенное значение выходного напряжения КР; T – длительность периода тока; $K_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент преобразования.

При токе предельной кратности (20 кА) полная токовая погрешность не превышает 5%. Отношение сигнал/шум превышает 40 дБ и соответствует [5].

Датчик напряжения (ДН) емкостно-омического типа размещается в опорном изоляторе и имеет характеристики:

Рабочее напряжение:	
линейное	110 кВ
фазное	63,5 кВ
Максимальное рабочее напряжение:	
линейное	126 кВ
фазное	2,7 кВ
Максимальное выходное напряжение:	
амплитудное	4,4 \pm 0,3 В
эффективное	3,1 \pm 0,2 В
Высота	1200 \pm 50 мм
Максимальный диаметр	208 мм
Испытательное напряжение делителя	480 кВ
Рабочая температура	–40, +70 °С
Стабильность показаний делителя при изменении температуры	менее 0,2%
Емкость секции измерения делителя	175,5 \pm 0,3 мкФ
Коэффициент деления делителя	24460 \pm 10
Коэффициент секции питания	3,5 мкФ
Напряжение секций питания делителя при рабочем напряжении 110 кВ	127 В (эф.)
Максимальная мощность секции питания	5 Вт
Выпрямленное напряжение секции питания	+5 \pm 0,2 В

Особенностью ДН является однородность конструкции с использованием одинаковых элементов (пленка, пропитка), одинакового коэффициента

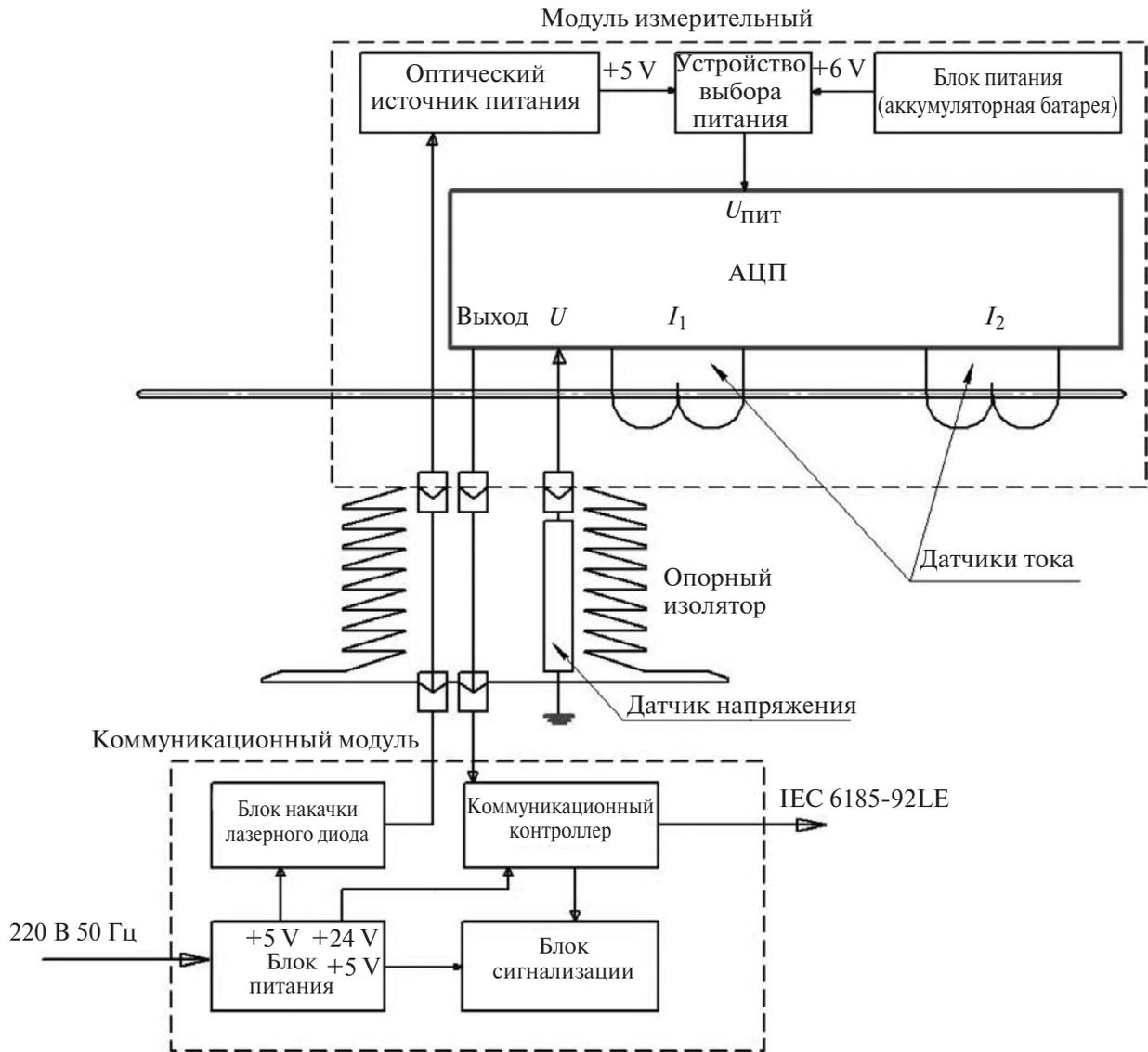


Рис. 1. Структурная схема ЦДТН

запрессовки частей, что позволяет обеспечить независимость коэффициента деления от температуры среды и обеспечить класс точности 0,2 [6]. Датчик напряжения обеспечивает отсутствие короны и достаточную импульсную прочность при грозовом импульсе амплитудой 480 кВ; ДН состоит из трех частей: емкость первой части ДН 7,184 нФ, $\text{tg}\delta = 0,0056$ ($f = 1$ кГц).

Вторая часть ДН (используется в качестве опции) – секция питания емкостью 3,53 мкФ с выходным напряжением 130,6 (при фазном напряжении 69,5 кВ).

Третья часть ДН – измерительная, выходное напряжение 2,6 В (при фазном напряжении 63,5 кВ).

Три части ДН соединены последовательно и помещены в корпус из полипропилена. Активное сопротивление 39 Ом, емкостное сопротивление $4,431 \times 10^5$ Ом; действующее значение тока 143 мА

(при фазном напряжении 63,5 кВ); активные потери 0,8 Вт.

Для ДН (рис. 3,а) предусматривается жесткая его фиксация с помощью ребер толщиной 5 мм внутри изоляционной трубы опорного изолятора.

Выполненные расчеты распределения электрических полей показали отсутствие перекрытия при

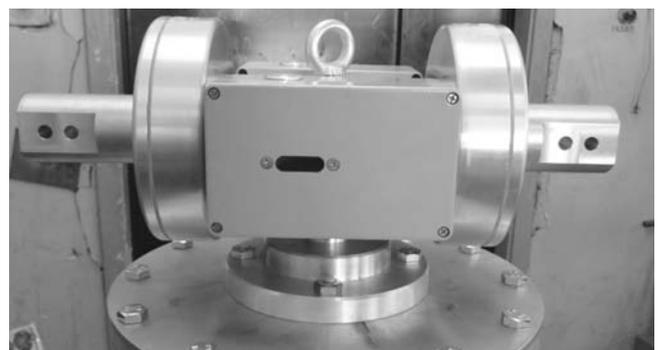


Рис. 2. Измерительный модуль

воздействии грозового импульса. Емкость ДН существенно выше его паразитной емкости на землю, а корона отсутствует, что обеспечивает высокую стабильность коэффициента деления.

Опорный изолятор ОИ служит для оптической связи между датчиками на высоком потенциале и оптическими разъемами на потенциале земли, передачи по оптоволокну питания на высокий потенциал и для размещения делителя напряжения в его корпусе.

В качестве ОИ используется серийный полимерный изолятор с внутренним диаметром 215 мм, наружным диаметром 345 мм, высотой 1150 мм. Выполняется в виде стеклопластикового полого цилиндра с металлическими фланцами, защищенного с наружной стороны ребристым защитным покрытием из кремнийорганической резины (рис. 3,б).

Плата аналого-цифрового преобразователя АЦП содержит операционные усилители, датчик температуры, аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором, цифровые микросхемы, передающие и принимающие оптические модули, источник опорного напряжения, импульсный источник питания.

Плата АЦП [7] предназначена для измерения и преобразования в цифровую форму аналоговых сигналов тока от датчиков тока и напряжения на высоком потенциале с последующей передачей по оптоволокну на низкий потенциал. АЦП имеет 8 каналов, 12 разрядов, диапазон входных напряжений 0,3,5 В, обеспечивает максимальную частоту сигнала до 8 кГц, входное сопротивление 1 МОм, защиту по напряжению аналоговых входов 150 В, стабилизированное напряжение питания 5 В; потребляемая мощность менее 1 Вт; АЦП характеризуется малым энергопотреблением [8], помехоустойчивостью, приемлемой точностью тракта 0,2. Плата АЦП размещается в металлическом корпусе для защиты от электромагнитных помех (степень защиты Р65Н).

Коммуникационный модуль на потенциале земли обслуживает до четырех фаз ЦДТН и содержит блоки питания ± 5 В и ± 24 В, блок накачки лазерного диода, блок сигнализации, коммуникационный контроллер со встроенной памятью команд, процессором, буферной оперативной памятью и развитой периферией, включающей контроллер интерфейса Ethernet, SPI и др. Выход КМ разработан в соответствии со стандартом IEC 61850-9-2LE.

Цифровой датчик тока и напряжения показан на рис. 4.

Заключение. Применение разработанной конструкции высоковольтных датчиков тока и напряже-

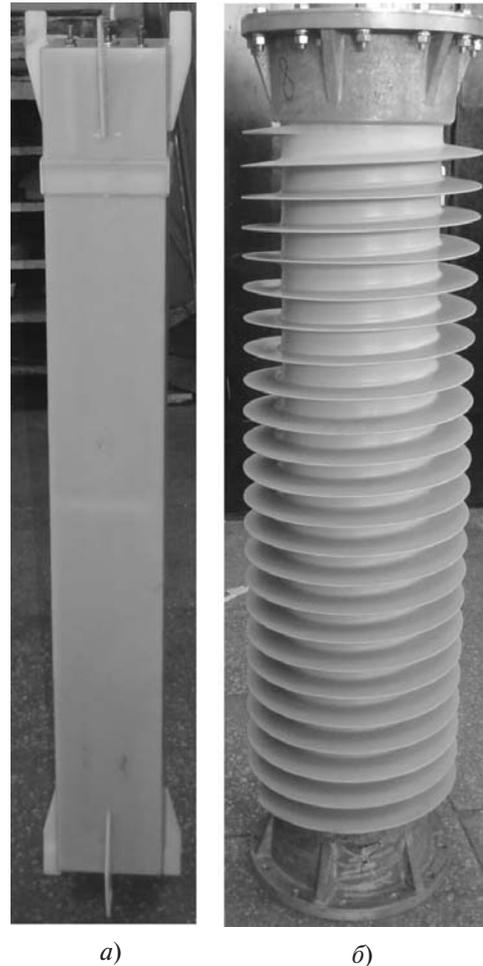


Рис. 3. Датчик напряжения (а) и опорный изолятор (б)



Рис. 4. Цифровой датчик тока и напряжения 110 кВ

ния с использованием гальванической развязки по оптическому волокну и работающих в соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2LE позволяют развить концепцию построения цифровых подстанций нового поколения, а также повысить надежность, помехоустойчивость, пожаро- и взрывобезопасность измерительных трансформаторов. Главным преимуществом в сравнении с аналогичными западными устройствами является проработанность конструкции в части резервирования по питанию и адаптация под условия применения в российских сетях. В соответствии с современными требованиями ведущих сетевых компаний в качестве первичных датчиков тока предложено использовать катушки Роговского с классом точности 5P для защиты. В качестве первичного датчика напряжения используется встроенный в опорный изолятор R–C-делитель напряжения с классом точности 0,2 на основе пленочных конденсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИЕС 60044-7,8. Electronic voltage transformers; Electronic current transformers.
2. ГОСТ 7746–2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – М.: Госстандарт.
3. ГОСТ 1983–2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. – М.: Госстандарт.
4. Фелько М.В. Датчики Роговского и перспективы их применения. – Энергоэкспорт, 2011, № 5.
5. ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010. Трансформаторы измерительные. Ч. 8. Электронные трансформаторы тока. – М.: Госстандарт.

6. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией. – Электричество, 2006, № 9.

7. Змиева К.А. Метод снижения энергопотребления за счет автоматического управления величиной реактивной мощности. – Вестник МГТУ Станкин, 2008, № 3.

8. Змиева К.А. Повышение энергоэффективности промышленных производств посредством создания автоматизированных программно-управляемых энергосберегающих систем. – Вопросы современной науки и практики (Университет им. В.И. Вернадского), 2009, № 9.

[28.03.12]

А в т о р ы : Шульга Роберт Николаевич окончил факультет машиностроения МГТУ им. Баумана в 1963 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование переходных процессов в ППТ 1500 кВ Экибастуз–Центр в ФГУП ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Змиева Кира Анатольевна окончила МГТУ Станкин в 2007 г. по специальности «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности». В 2010 г. защитила кандидатскую диссертацию «Автоматизированное управление энергопотреблением машиностроительных производств с целью повышения их энергоэффективности» в МГТУ Станкин. Заместитель начальника научно-исследовательской части МГТУ Станкин.

Должникова Евгения Юрьевна окончила МГТУ Станкин в 2007 г. по специальности «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности». Инженер МГТУ Станкин.

Тимофеев Евгений Михайлович окончил Московский энергетический институт (ТУ) в 2003 г. Аспирант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» «НИУ «МЭИ».

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

- полные имена и отчества всех авторов;
- какой факультет, какого вуза и когда закончил;
- когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;
- место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.