

## Авторы:

Разумов Р.В.,  
Петров А.А.,  
Трифонов Д.В.,  
Иванов А.В.,

ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия,  
Басаркин В.А.,  
ОАО «СО ЕЭС»  
РДУ Татарстана, Россия.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗА ОБОРУДОВАНИЯ С АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ УСТАВКОЙ. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА АОПО НА ЗАИНСКОЙ ГРЭС И ПС ТАМАНЬ

Аннотация: в статье рассмотрены подходы к организации системы автоматики ограничения перегруза оборудования с корректировкой токовой уставки по температуре окружающей среды. Предлагаемый подход проанализирован в сравнении с «классическим» алгоритмом на основании время-токовой характеристики. Проанализированы основные типовые ошибки проектирования, предложены правильные варианты применения функции. Рассмотрены нормативные документы, на основании которых требуется проводить настройку АОПО с корректировкой уставки по температуре окружающей среды при применении ее на воздушной и кабельной линии, трансформаторе и автотрансформаторе. В качестве примера рассмотрены основные технические решения проекта реконструкции АОПО Заинской ГРЭС.

Ключевые слова: автоматика ограничения перегруза оборудования / Противоваварийная автоматика / Противоваварийное управление энергосистемами и энергообъединениями.

Бесперебойная передача выработанной на электрических станциях электроэнергии требуемого качества к конечному потребителю является одной из основных задач сетевых организаций и Системного Оператора. Генерирующие компании также заинтересованы в бесперебойной передаче выработанной электрической энергии на технологических уровнях, обеспечивающих максимальный экономический эффект при минимальном износе парка генерирующих мощностей.

Любые отключения перегруженных связей в распределительных сетях напрямую сказываются на количестве вырабатываемой электроэнергии на станциях. Устройства ПА в автоматическом режиме вводят ограничения на выработку электроэнергии, что приводит к снижению экономической эффективности работы станции ввиду недопуска электроэнергии. Как следствие, важной задачей современных систем ПА является автоматическое обеспечение ограничений перегруза первичного оборудования с повышением его пропускной способности, если таковые технические возможности имеются.

Основными элементами электрической сети, по которым осуществляется передача выработанной электрической электроэнергии, являются воздушные линии и трансформаторы, реже – кабельные линии. Повышение пропускной способности сетей с сохранением срока службы первичного оборудования является нетривиальной задачей, однако вполне выполнимой. Для этого в последние годы в конкурсной документации на реконструкцию систем АОПО присутствует требование, чтобы автоматика могла работать по фактической температуре окружающей среды и в зависимости от этой величины проводить изменение токовой уставки АОПО – так называемая автоматика ограничения перегруза оборудования с корректировкой токовой уставки по температуре окружающей среды («адаптивная токовая уставка»). Проводить выдачу управляющих воздействий от АОПО с учетом характеристик фактической токовой перегрузки, температуры окружающей среды и времени перегруза лучше, чем просто по время-токовой характеристике, как это делалось ранее («классический» АОПО). Стоит отметить, что и при классической реализа-



**Разумов Роман Владимирович**

Дата рождения: 14.01.1986 г.  
В 2008 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности инженер. Руководитель сектора инжиниринга устройств автоматики ООО НПП «ЭКРА».



**Трифонов Денис Викторович**

Дата рождения: 28.02.1988 г.  
В 2012 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности магистр техники и технологии. Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА».



**Петров Алексей Александрович**

Дата рождения: 30.06.1988 г.  
В 2011 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности магистр техники и технологии. Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА».

ции функции АОПО учет температуры несомненно присутствует, однако в косвенном виде: на панели АОПО устанавливается оперативный переключатель с несколькими группами уставок. В зависимости от пожеланий Заказчика и требований филиалов СО ЕЭС на одних панелях используют две группы уставок «Зима» и «Лето», на других три – «Зима», «Лето», «Межсезонье». Расчет уставок для указанных групп уставок основан на изучении географического местоположения объекта применения АОПО и сопоставления его с картой сезонных эквивалентных температур охлаждающего воздуха, по которым выбираются среднесезонные температуры воздуха. Аналогичная информация приведена и в электротехнических справочниках [1, таблица 1.37]. Исходя из этих параметров по методике (изложенной, к примеру для ВЛ в [2,3]) выбираются токовые и временные значения допустимых перегрузок для линии. Однако исходя из приведенных характеристик в [2], для ВЛ становится очевидно, что даже при небольших колебаниях температуры как суточной, так и возникающей в пределах одного сезона, пропускная способность воздушных линий меняется существенно, что влечет за собой при «сезонных» уставках существенные погрешности при выборе реальных значений возможных перегрузок первичного оборудования. Замер фактической температуры окружающей среды позволяет в автоматическом режиме учитывать фактическую перегрузочную способность первичного оборудования в зависимости от сезонных, суточных и других колебаний температуры.

Вследствие вышеописанных причин становится понятным, что устройства АОПО, работающие с корректировкой токовой уставки по температуре окружающей среды (далее АОПО(t)) и «классический» АОПО, с «сезонным» режимом работы (далее АОПО(k)) имеют различные характеристики срабатывания (рис. 1.), соответственно и управляющие воздействия этих двух принципов в ряде режимов будут схожи, а в ряде режимов от-

личаться. Для наглядного представления различий разобьем температурно-токовое поле, характеризующее работу воздушной линии на 5 зон, ограниченных характеристиками АОПО(t) и АОПО(k). Для АОПО(t) область срабатывания – зоны №1 и №5, для АОПО(k) область срабатывания – зоны №1 и №2. Алгоритмы работы АОПО(k) и АОПО(t) при попадании характеристики в зоны №2 и №5 разные:

1) зона №2 характеризуется температурой окружающей среды ниже климатической нормы (зимние морозы или летнее похолодание), при которой происходит существенное повышение пропускной способности ВЛ ввиду более быстрого остывания проводников. Алгоритм АОПО(t) синхронно с процессом снижения температуры увеличивает токовую уставку согласно характеристики АОПО(t). Следствием такой корректировки становится повышение пропускной способности ВЛ при сохранении перегрузочной характеристики и механических свойств в допустимых пределах.

2) зона №5 характеризуется температурой окружающей среды выше климатической нормы (оттепель зимой или летний зной), при которой происходит существенное снижение пропускной способности воздушных линий ввиду их более медленного остывания. Алгоритм АОПО(t) синхронно с процессом повышения температуры снижает токовую уставку согласно характеристики АОПО(t). Отсутствие учета фактического перегрева зоны №5 чревато для эксплуатируемого оборудования ВЛ рядом возможных технологических проблем: в долгосрочной перспективе – снижением сроков службы первичного оборудования, в краткосрочной – изменением геометрии провиса проводов воздушной линии до недопустимых пределов, нахлестом их на нижестоящие провода и/или кустарники с последующим отключением ВЛ устройствами РЗ, что с точки зрения системной надежности приведет только к ухудшению ситуации в ЭС. Наброс нагрузки в такой ситуации на параллельные шунтирующие

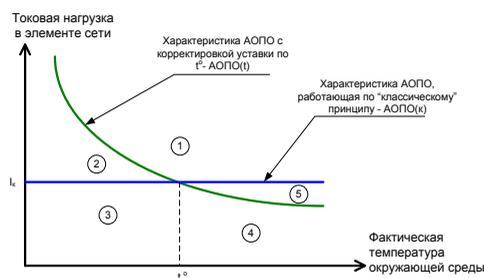


Рис. 1. Характеристика срабатывания АОПО температура - ток

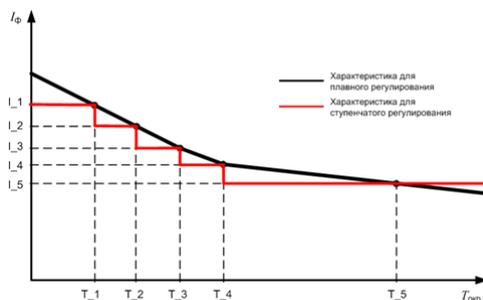


Рис. 2. Два варианта характеристики срабатывания измерительного органа АОПО (t)



**Иванов Александр Витальевич**

Дата рождения: 29.06.1992 г.  
В 2014 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности инженер. Инженер 2 кат. ООО НПП «ЭКРА».



**Басаркин Виталий Алексеевич**

Дата рождения: 27.07.1975 г.  
В 1998 г. окончил Казанский филиал Московского энергетического института по специальности «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», Начальник отдела противоаварийной автоматики СРЗА филиала ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана.

связи может повлечь за собой каскадный эффект с отключениями и в конечном итоге, как самый пессимистичный сценарий, привести к возникновению системной аварии, как это уже не раз было в мировом опыте – например, 13 августа 2003 г. авария в США с последующим погашением 14 августа 2003 г. г. Нью-Йорка и прилегающих территорий и потерей около 63 ГВт мощности [4].

Описанные проблемы термических перегрузок ВЛ характерны и для трансформаторов (в т.ч. автотрансформаторов) и кабельных линий (далее КЛ). Методика расчета параметров нагрева для ВЛ отражена в СТО ФСК ЕЭС [2] с результирующими графиками зависимости допустимых перегрузок для выпускаемых марок проводов, и останавливаться подробно на изложении этого материала не будем. Опасности перегрузок трансформаторов и автотрансформаторов приведены в [6]:

- снижение электрической прочности изоляции вследствие возможного появления пузырьков газа в обмотках или соединениях (основная проблема, вызывающая отказ трансформаторов);
- ухудшение механических свойств при повышенной температуре снижает стойкость трансформатора к токам КЗ;
- пробой во вводах вследствие повышения давления в них и утечки масла;
- при расширении масла может произойти его перелив из расширителя, а это может привести к образованию в нем трещин;
- работа РПН трансформатора по переключению при высоких перегрузочных токах опасна вероятной аварией.

Методика расчета, предлагаемая [5,6], позволяет из текущей токовой перегрузки трансформатора и температуры окружающей среды рассчитать температуру масла и обмоток в транс-

форматоре, а из них вычислить допустимое время перегруза (т.е. выдержку времени на срабатывание ступени АОПО). Предлагаемый расчет достаточно прост, рекомендованные к применению результирующие этого расчета приведены в СТО ФСК ЕЭС «Инструкция по эксплуатации трансформаторов» [5].

Изложенные принципы функционирования АОПО(t) для ВЛ и трансформаторов легли в основу разработанного типизированного технического решения по шкафу ШЭЭ 22Х 0108. Устройство предусматривает возможность выбора двух режимов работы – «адаптивный» (с корректировкой уставки по температуре окружающей среды) и «неадаптивный» (с работой по классической время-токовой характеристике без контроля температуры окружающей среды).

Одним из инструментов типизации шкафа ШЭЭ 22Х 0108 является программный выбор типа наклонной – плавная и ступенчатая (рис. 2). Плавная характеристика применяется большей частью для ВЛ и описана в [2], ступенчатая же характеристика рекомендована для применения на трансформаторах со сроком службы более 30 лет в соответствии с письмом ОАО «ФСК ЕЭС» в адрес ОАО «СО ЕЭС» [7]: «...При использовании вышеуказанных таблиц стандарта для определения допустимой кратности аварийных перегрузок, для промежуточных значений температуры окружающего воздуха необходимо выбирать ближайшее меньшее значение кратности для большей температуры окружающего воздуха...». С целью достоверизации температуры окружающей среды в устройстве АОПО(t) предусмотрена возможность подключения до 4 датчиков температуры (основная и резервная пара, в каждой паре основной и резервный датчик). Алгоритм АОПО(t) в случае рас-

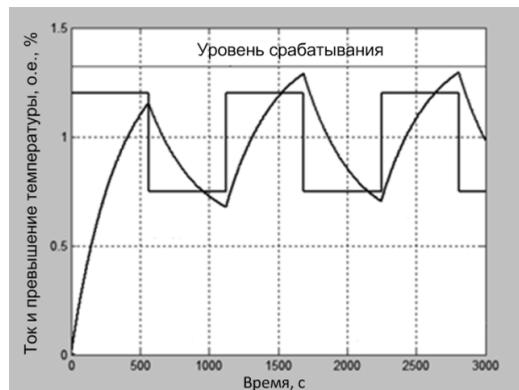


Рис. 3. Изменение превышения температуры при изменяющейся нагрузке

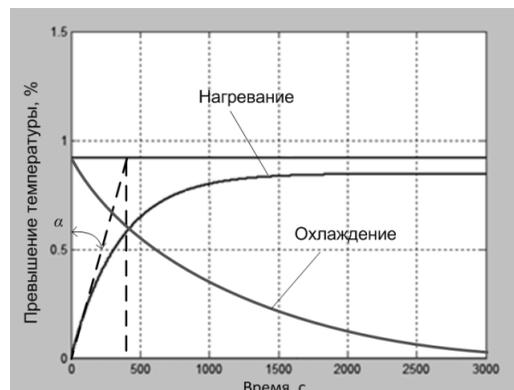


Рис. 4. Изменение превышения температуры при неизменной нагрузке

согласования двух измерений основной пары датчиков переключится на резервную пару. В случае, если данные о температуре на резервной паре также становятся недостоверными, то существуют два варианта последующей работы шкафа АОПО(t): вариант №1 – по последнему корректному значению температуры, измеренному устройством АОПО(t), вариант №2 – переход на «сезонную» уставку.

Широкое применение типизированного решения АОПО(t) с установкой на ВЛ и трансформаторах выявило невозможность его практического применения на КЛ. Изоляционной и охлаждающей средой ВЛ является воздух, для обмоток трансформатора такой средой выступает трансформаторное масло. Они достаточно эффективно и быстро обеспечивают остывание проводников ВЛ и обмоток трансформатора, однако изоляционная среда электрических жил кабеля не в состоянии быстро отводить тепло, потому при колебаниях термических токов, а также в случае возникновения повторных перегрузок через минимальное время требуется учитывать и запоминать предыдущие перегревы (рис. 3). Решение проблемы термических защит в РЗ – тепловая защита элемента первичного оборудования. Данное решение в полной мере подходит и под те технические требования и задачи, которые должен решать алгоритм АОПО\_КЛ(t): устройство должно оценивать превышение температуры в номинальном режиме, а также в кратковременных и повторно-кратковременных режимах (т.е. измерительный орган должен работать по тепловой модели КЛ с непосредственным расчетом температуры жил). Угол наклонных характеристик нагревания и остывания (рис. 4) определяется исходя из марок кабеля и их индивидуальных характеристик, отраженных в технической документации на них.

Тепловые расчеты кабельных линий, которые являются опорными для расчета уставок функции АОПО\_КЛ(t), приведены в ГОСТ [8, 9], а также СТО ФСК ЕЭС [10]. В АОПО(t) с контролем температуры окружающей среды ВЛ или трансформатора используются датчики тем-

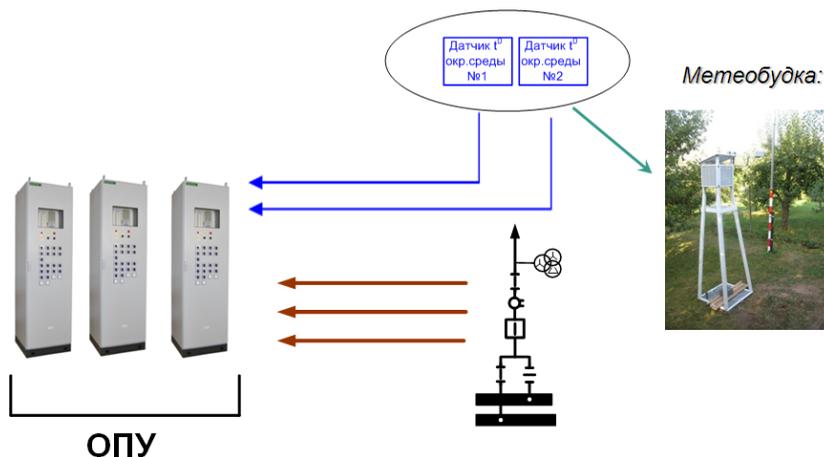


Рис. 5. Правильная установка датчиков температуры для организации АОПО(t)



Рис. 6.1. Организация метеобудки с измерением температуры воздуха на Заинской ГРЭС



Рис. 6.2. Метеобудка с измерением температуры воздуха на ПС 500 кВ Тамань

пературы воздуха, однако в АОПО\_КЛ(t) окружающей средой прокладки кабеля не всегда выступает воздушная среда, зачастую окружающей средой для кабеля становится грунт или же водная среда. Соответственно, для контроля температуры окружающей среды КЛ в случаях прокладки в грунте нужно применять датчики, устанавливаемые рядом с КЛ в грунт на такую же глубину, в случае прокладки в водной среде – датчики с морским погружным исполнением.

Теоретические выкладки для применения и расчета уставок функции АОПО с контролем температуры окружающей среды для ВЛ или КЛ, трансформатора или автотрансформатора в достаточной мере проработаны и регламентированы существующими действующими нормативными документами и ГОСТами [2, 3, 5, 6, 8, 9, 10], что создает достаточно большую возможность для организации функции АОПО(t) на объектах энергетики.

Как показала практика применения устройств АОПО(t), после отгрузки оборудования организовать в кратчайший срок первые пуско-наладочные работы удалось, но с большими затруднениями ввиду того что многое просто не было преду-

смотрено согласованным проектным решением. Одним из ярких примеров является то, что в ходе пуско-наладочных работ шкафа при исправных датчиках температуры была зафиксирована разница показаний между парой датчиков в 12,5 °С. Причина банальна – неправильная установка датчиков температуры, а именно их географическое разнесение по разным сторонам ОРУ подстанции. Стоит сказать, что цифровые датчики температуры являются средством измерения, в нашем случае – измерения температуры воздуха на открытой местности, и должны устанавливаться в специально оборудованные места для проведения корректных измерений, а именно в метеобудку (рис. 5). Во избежание подобных ошибок НПП «ЭКРА» в июне 2014 г. было подготовлено Информационное письмо №36 о правильной установке датчиков температуры для АОПО [11]: «...датчики температуры и влажности устанавливаются на высоте 2 м над землёй в метеобудке – это небольшой деревянный ящик (размером приблизительно 40\*40\*40 см) с белыми, отражающими свет перфорированными или жалюзиными стенками, а также солнцезащитным козырьком (крышка будки должна быть герметичной и иметь наклон для стекания осадков с будки). В худшем случае (при этом велик риск погрешностей, особенно в ночное время) датчик Т и влажности может

быть установлен с теневой стороны здания, на высоте 2 м над землёй, на штанге длиной как минимум 3 метра от стены, над газоном (не над асфальтом!). Ни в коем случае не рекомендуется устанавливать их поблизости от сильно нагревающихся поверхностей, например, крыш, стен и т.п. В связи с этим с целью исключения излишней работы автоматики АОПО с корректировкой уставки по температуре окружающей среды предлагаем устанавливать цифровые датчики температуры». Данное решение на сегодняшний день применяется всеми производителями АОПО(t) и стало правилом при проектировании системы.

Примером образцового проекта реконструкции АОПО с корректировкой токовой уставки по температуре окружающей среды может служить Заинская ГРЭС, где проектировщиком выступил ООО «Проектный центр «ЭКРА». Техническими решениями была предусмотрена установка шкафов АОПО(t). Для повышения достоверности данных о температуре окружающей среды системы АОПО в метеобудке были установлены две пары датчиков температуры (рис. 6). В нормальном режиме АОПО работает по основной паре, в случае рассогласования данных по температуре основной пары датчиков предусмотрен переход на данные резервной пары.



Рис. 7. Шкаф с промежуточными преобразователями для АОПО(t) навесного исполнения типа ШНЭ 9933.001 (фото ПС 500кВ Тамань – Крымский энергомот)



Рис. 8. Передача данных о температуре окружающей среды при применении ШНЭ 9933.001 (фото Заинская ГРЭС)

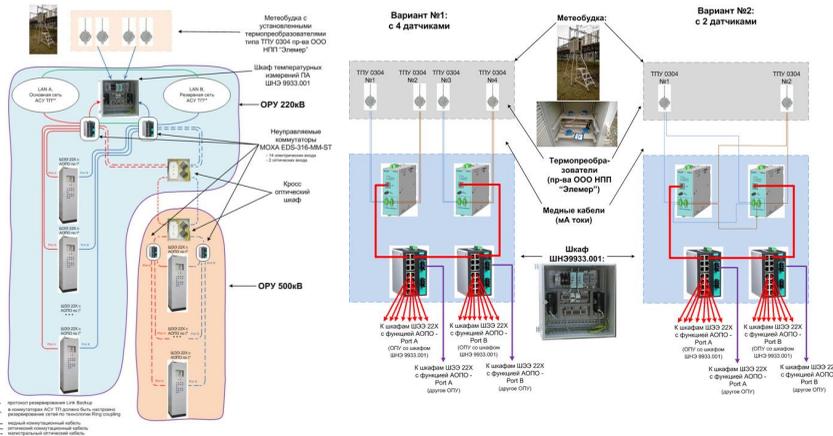


Рис. 9. Пример организации сети обмена данными на объекте с применением АОПО(t)

- Температура окружающего воздуха на объекте;
- Состояния работы каждого терминала АОПО(t): введен / выведен;
- Текущий ток через контролируемое АОПО(t) присоединение пофазно;

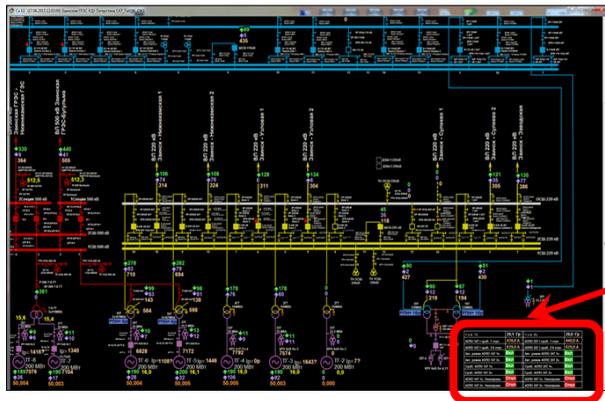


Рис. 10. Организация ОИК с вводом данных от АОПО(t) в помощь диспетчеру. Пример ОИК РДУ Татарстана

Устройствами АОПО(t) предусматривается возможность ввода значений температуры от датчиков как непосредственно в виде унифицированного мА сигнала (рекомендуемый унифицированный диапазон 4÷20мА, так как он достоверно позволяет выявить обрыв провода), так и в цифровом формате (используя промежуточные преобразователи мА тока в цифровую форму) протокола IEC 61850-8-1 GOOSE. Прямой ввод мА токовых цепей в устройства АОПО(t) рекомендуется, когда на объекте устанавливается небольшое количество панелей АОПО(t). Токковые мА цепи подключаются последовательно к панелям АОПО(t), образуя токовую петлю. Однако увеличение количества

панелей АОПО(t), последовательно обвязанных миллиамперным током, увеличивает вероятность их единичного обрыва и повреждения при эксплуатации. Поэтому когда количество панелей АОПО(t) на объекте превышает 5-8 штук (либо планом реконструкций и замены в скором будущем на объекте планируется превысить это количество панелей), с целью повышения надежности системы АОПО рекомендуется организовать передачу данных о температуре окружающей среды в цифровом формате, для чего в систему АОПО необходимо встроить промежуточное устройство с цифровыми преобразователями унифицированного мА тока в стандарт IEC 61850-8-1 (рис. 7).

Применение цифрового преобразования данных о температуре окружающей среды (в шкафу ШНЭ 9933.001 с резервированием аппаратной базы) делает возможным подключение неограниченного количества шкафов АОПО(t) (рис. 8). Резервированная кольцевая структура сети IEC 61850-8-1 обеспечивает гарантированную доставку данных о температуре в каждое устройство и возможность «безболезненного» вывода любой панели АОПО(t) на обслуживание. В шкафу преобразователей проектом предусматриваются электрические интерфейсы Ethernet для организации обмена данными со шкафами АОПО(t), которые находятся в непосредственной близости, т.е. в одном ОПУ, а также оптические интерфейсы для организации связи со шкафами АОПО, которые географически разнесены, например, на больших подстанциях, где здания ОПУ с оборудованием 220 кВ географически разнесены со зданием ОПУ оборудования 500 кВ.

Дополнительным преимуществом использования шкафов ШНЭ 9933.001 является и централизованное измерение температуры воздуха на объекте установки АОПО(t). Несмотря на то, что мА входа устройств АОПО(t) обеспечивают погрешность измерения тока не более 0.15%, разница в вычисленной величине температуры между всеми панелями АОПО(t), обвязанными по мА току, будет на уровне десятых градуса, как следствие, в дублирующих друг друга комплектах АОПО(t) (согласно требованиям п. 6.3, [12]) незначительно, но все же будет отличаться и уставка срабатывания по току. Особенно разноточность данных о температуре окружающей среды и токовой уставки срабатывания становятся заметными, когда все панели АОПО интегрируются в единую сеть АСУ ТП с последующим предоставлением данных о параметрах своей работы оперативному персоналу энергообъекта, РДУ и ОДУ с интеграцией информации в ОИК СО ЕЭС для помощи дежурному диспетчеру энергосистемы (рис. 9). Типовой перечень передаваемых от каждой панели АОПО(t) в ОИК данных это (рис. 10):

- измеренная температура окружающего воздуха;
- измеренный ток в каждой фазе контролируемого присоединения;
- вычисленные токовые уставки срабатывания каждой ступени АОПО(t) в зависимости от текущей температуры окружающей среды.

Соблюдение изложенных выше требований к проекту, а также его технической реализации в полной мере позволяют создать полноценную систему АОПО с корректировкой уставки по температуре окружающей среды для всех типов присоединений (воздушная и кабельная линия, трансформатор и автотрансформатор) и эксплуатировать их, обеспечивая повышение технико-экономических показателей как по пропускной способности присоединений, так и с точки зрения продления срока эксплуатации оборудования при соблюдении требований к нормам и параметрам допустимых термических перегрузок. Безусловно, некоторые читатели могут стать оппонентами отдельных тезисов, изложенных в данной статье, т.к. принцип измерения температуры окружающей среды в месте установки оборудования в полной мере корректен для трансформаторов и автотрансформаторов, а также кабельных линий (ввиду того что температура грунта относительно постоянная на всем протяжении прокладки кабеля), но не в полной мере учитывает многофакторность изменения температуры окружающей среды для воздушных линий на протяжении всей ее длины. Температура окружающей среды на протяженных линиях может существенно меняться, меняется она и от рельефа местности, который пересекает ВЛ, и должна учитываться на стадии расчета и задания уставок с учетом корректировки характеристики ВЛ (рис. 2) по самому теплому географическому месту прохождения. Сегодня в статьях [13, 14, 15] активно развивается метод организации автоматики АОПО(t) с непосредственным замером температуры проводов ВЛ и установкой для этих целей датчиков на линии. Предлагаемый метод является более точным относительно описанного в данной статье, но несет за собой куда более масштабные затраты, связанные

с необходимостью установки целой серии датчиков температуры на ВЛ, необходимостью поддержки с каждым из датчиком температуры двух дублированных каналов GSM связи, разработки мер по кибербезопасности виртуальной сети, а также создания на объекте отдельной подсистемы для приема данных от датчиков линий по требованию [п. 6.6, 12] о невозможности аппаратного совмещения устройств и комплексов ПА с техническими средствами АСУ ТП объекта электроэнергетики. Очевидно, что метод, предлагаемый в данной статье, приводит к куда меньшим затратам, чем метод организации автоматики АОПО(t) с непосредственным замером температуры проводов ВЛ, и является незначительно более дорогим, чем «классический» метод организации АОПО, так как приводит к необходимости покупки датчиков температуры и метеорологической будки. Каждый из описанных методов имеет право на жизнь и при проработке технического решения для каждого объекта энергетики должен быть экономически обоснован. Конечно же, концепция измерения температуры самих проводов ВЛ при непосредственном замере весьма перспективна, и работы в этом направлении ведутся, однако говорить о технической завершенности инженерных решений в этой области пока рано, потому, считаем, что в ближайшие годы предстоит пройти немало проработок, дебатов и, конечно же, опытной эксплуатации, прежде чем непосредственный контроль температуры проводов ВЛ можно будет назвать серийным решением, каким на сегодняшний момент является контроль температуры окружающей среды и корректировка по данному значению токовой уставки в АОПО(t).

### Выводы

1. Предложен способ организации АОПО(t) с корректировкой токовой уставки по температуре окружающей среды.
2. Показаны основные способы организации автоматики АОПО(t) с перечислением типовых проектных ошибок, предложены методы их решения.
3. Изложены сравнения предлагаемого в статье принципа АОПО(t) с «классическим» методом, а также пер-

спективным методом организации АОПО с контролем температуры проводов через непосредственный замер.

4. На основании предлагаемых решений показаны ключевые моменты проектов реконструкции системы АОПО(t) на Заинской ГРЭС и ПС Тамань, которые могут быть тиражированы в качестве опорных на всех объектах электроэнергетики.

### Литература:

1. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 608 с. ил. ISBN 5-283-01086-4.
2. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. – 2013.
3. РД 34.20.547. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. – 1987.
4. P. Pourbeik, P.S. Kundur, C.W. Taylor. The Anatomy of a Power Grid Blackout // IEEE power & energy magazine. – 2006.
5. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». СТО 56947007-29.180.01.116-2012. Инструкция по эксплуатации трансформаторов. – 2012.
6. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – 1985.
7. Письмо ОАО «ФСК ЕЭС» №Ч4-9128 от 22.10.2012 в адрес ОАО «СО ЕЭС»: «Об использовании принципа линейной интерполяции».
8. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения. – 2009.
9. ГОСТ Р МЭК 60287-1-2-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-2. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Коэффициенты потерь, обусловленных вихревыми токами в оболочке, для двух цепей, расположенных в одной плоскости. – 2009.
10. СТО 56947007-29.060.20.170-2014. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. – 2014.
11. Информационное письмо НПП ЭКРА №36, 2014 г. ([http://www.ekra.ru/uploads/posts/2014-06/1401713738\\_36.jpg](http://www.ekra.ru/uploads/posts/2014-06/1401713738_36.jpg)).
12. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. – 2013.
13. Лебедев Г.М., Алтунин С.В. Диагностика и мониторинг воздушных линий электропередачи: методические указания к практическому занятию по дисциплине «Диагностика электрооборудования систем электроснабжения» [Электронный ресурс] для студентов направления подготовки 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа «Электроэнергетика», очной формы обучения / сост.: Г.М. Лебедев, С.В. Алтунин. – Кемерово: КузГТУ. – 2014. – 114 с.
14. Балликоев Б., Хостанцев А., Шмелькин А., Шейнман А. Новые возможности интеллектуальных систем противоаварийной автоматики для распределительных систем сетей 110 кВ // Автоматизация и ИТ в энергетике. – №4. – 2013.
15. Самарин А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // Control Engineering Россия. – №3(45). – 2003.