

---

**Централизованная  
противоаварийная автоматика  
ЭЭС с учетом наличия в  
энергосистеме распределенной  
генерации, а также режимов  
работы потребителей**



**А.Б. Осак, Д.А. Панасецкий,  
А.В. Домышев, Е.Я. Бузина  
ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск  
osakalexey@mail.ru**

# Постановка задачи

Развитие противоаварийного управления должно учитывать появление новых генерирующих установок и новых электроприемников со всеми своими особенностями.

Предлагается обратить внимание на три направления при развитии средств противоаварийной автоматики (ПА):

- учет особенностей частотно-регулируемого электропривода в аварийных режимах;
- учет особенностей малой генерации;
- реализация управляющих воздействий (УВ) от ПА на отключение нагрузки (ОН) в распределительных сетях, используя различные каналы передачи информации.

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

Свойства ЧРП и других электроприемников, выполненных на базе элементов силовой электроники:

- **отсутствует регулировочный эффект нагрузки** по частоте и напряжению при их изменении в допустимом диапазоне;
- **узкий рабочий диапазон допустимых уровней напряжений** (особенно в сторону повышения) на вводах ЧРП (при выходе за допустимый диапазон ЧРП отключаются встроенными защитами).

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

С позиции электропривода отсутствие зависимости потребляемой мощности от частоты и напряжения в сети является преимуществом. Но для ЭЭС это является проблемой.

Например, при глубоком снижении напряжения в сети увеличивается ток нагрузки ЧРП, идет рост потерь реактивной мощности в элементах сети, что приводит к еще большей просадке напряжения в сети.

При значительной доле таких потребителей это **может приводить к лавине напряжения** и системной аварии в условиях дефицита регулируемых источников реактивной мощности:

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

Узкий рабочий диапазон допустимых уровней напряжений вызван большой стоимостью самих полупроводниковых элементов силовой электроники. Полупроводниковые элементы очень чувствительны к перенапряжению.

Расширение диапазона допустимых напряжений повышает стоимость ЧРП:

- Увеличение максимального допустимого напряжения осуществляется либо за счет применения более дорогих полупроводниковых элементов, либо за счет последовательного соединения нескольких элементов.
- Снижение минимального допустимого напряжения осуществляется за счет снижения рабочего напряжения инвертора и двигателя, что приводит к росту номинального тока инвертора, соответственно требуется либо применения более дорогих полупроводниковых элементов, либо за счет параллельного соединения нескольких элементов.

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

Поэтому потребители часто ставят ЧРП, для которых допустимо краткосрочное перенапряжение всего на 120-140% от номинального напряжения.

Автоматические системы управления ЧРП являются быстродействующими, так как управляют полупроводниковыми ключами выпрямителя и инвертора с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

**Внутренние защиты ЧРП срабатывают за доли периода, то есть быстрее устройств РЗ и ПА в ЭЭС и существенно быстрее автоматических регуляторов напряжения для переключения РПН.**

Для энергорайонов с преобладающей нагрузкой ЧРП в условиях дефицита регулируемых источников реактивной мощности **при отключении нагрузки в одной точке сети происходит скачкообразный рост напряжения на вводах ЧРП в других местах с последующим отключением ЧРП и развитием системных аварий.**

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

Электропривод с ЧРП является элементом технологического производственного процесса. **Остановка одного или нескольких ЧРП может привести к технологическому нарушению всего производственного процесса и последующему аварийному отключению всех электроприемников.**

На химических и нефтехимических производствах это может привести к единовременному отключению почти всех крупных электроустановок.

На нефтепроводах отключение ЧРП на одной нефтеперекачивающей станции (НПС) может привести к остановке целого участка нефтепровода, например, до 10 НПС с суммарной нагрузкой до 200-300 МВт, которая должна учитываться как нормативное возмущение по причине отключения по одной общей причине.

# Особенность частотно-регулируемого электропривода

В этих условиях меняются задачи как режимной, так и противоаварийной автоматики.

Существующие сегодня устройства АОСН и АОПН имеют такие уставки как по времени, так и по величине напряжения, что **отключение потребительских электроустановок на базе элементов силовой электроники, в частности ЧРП, происходит раньше срабатывания устройств ПА.**

А массовое отключение потребителей в ЭЭС уже является каскадным развитием аварии, а значит, традиционная ПА в некотором смысле уже не выполняет возложенные на нее задачи.

Основным средством предотвращения каскадного отключения потребителей становится режимная автоматика и плавно регулируемые источники реактивной мощности, быстродействие которых должно быть достаточным, чтобы не допустить аварийного отключения ЧРП и других электроустановок на базе силовой электроники.



# Особенность частотно-регулируемого электропривода

Предлагается в энергорайонах с большой долей ЧРП создавать централизованные комплексы противоаварийной и режимной автоматики, которые должны решать следующие задачи:

- **превентивное управление дискретно управляемыми и плавно регулируемыми источниками реактивной мощности в заранее рассчитанном объеме по факту коммутаций (а не только по факту отклонения напряжения);**
- **автоматическую координацию и согласование уставок локальных регуляторов, локальной режимной и противоаварийной автоматики,** что позволит более эффективно регулировать напряжение в сети, минимизировать потери за счет оптимизации потоков реактивной мощности в сети, снизить требования к резерву источников реактивной мощности.

# Особенность малых ГТУ и ГПУ в автономных энергосистемах и режимах

В последнее время идет достаточно массовое внедрение современных ГТУ и ГПУ как в автономных энергосистемах, так и в ЕЭС России. ГТУ большой мощности устанавливаются на традиционных электростанциях. ГТУ и ГПУ малой мощности устанавливаются в автономных энергосистемах, а также в сетях электроснабжения промышленных предприятий.

Когда ГТУ и ГПУ работают в составе ЕЭС, то в рамках противоаварийного управления необходимо решать традиционные задачи динамической устойчивости с учетом фактических характеристик конкретных генерирующих установок.

Существенно отличаются проблемы противоаварийного управления в автономных энергосистемах, а также в режимах аварийного отселения от ЕЭС сетей электроснабжения крупных промышленных предприятий, в которых среди прочей нагрузки значительную долю занимает ЧРП, с вышеописанными особенностями работы в аварийных режимах.

# Особенность малых ГТУ и ГПУ в автономных энергосистемах и режимах

В автономных энергосистемах и в автономных режимах работы сетей электроснабжения промышленных предприятий можно отметить следующие особенности:

- относительно небольшая суммарная установленная мощность генерации автономной энергосистемы, мощность самых крупных электроприемников сопоставима с мощностью генераторов;
- малый момент инерции генерирующего оборудования, соответственно даже небольшие небалансы активной мощности (сброс или наброс нагрузки) приводят к существенным ускорениям и как следствие к быстрому отклонению частоты, на которые не успевают отреагировать штатные системы управления ГТУ;
- жесткие заводские ограничения применяемых ГТУ и ГПУ по отклонению частоты (вместо стандартных для большой энергетики 46-55 Гц в малой генерации могут ограничивать 48-52 Гц), что приводит к полной остановке всей генерации автономной энергосистемы при авариях.

# Особенность малых ГТУ и ГПУ в автономных энергосистемах и режимах

Основной причиной системных аварий в автономных энергосистемах является **возникновение существенного небаланса активной мощности, вызванного массовым отключением потребителей и генерации**, вследствие даже легких возмущений в электрической сети (КЗ на потребительских фидерах низкого класса напряжения).

Когда начинается отключение крупных потребителей после первичного возмущения, то далее лавинообразно отключаются и все остальные потребители, и генераторы из-за появления скачков напряжения и частоты, которые возникают из-за существенных небалансов активной и реактивной мощности. В этих случаях проявляется недостаточная эффективность ступенчатых принципов АОСЧ/АОПЧ ввиду быстрого развития аварийной ситуации и выхода за границы допустимых параметров.

# Особенность малых ГТУ и ГПУ в автономных энергосистемах и режимах

Особенности автономных энергосистем и аварийно отделившихся от ЕЭС энергорайонов с объектами малой генерации предъявляют специальные требования к их противоаварийному управлению.

Основной задачей является **обеспечение за малое время баланса активной и реактивной мощности** в достаточно жестких пределах. Необходима достаточно **точная дозировка УВ сразу на первой ступени ПА** при возникновении первичного небаланса.

# Особенность малых ГТУ и ГПУ в автономных энергосистемах и режимах

Предполагается создавать иерархическую централизованную АОПЧ и АОСЧ со следующими особенностями и функциями:

- двухфакторный контроль небалансов:
  - по фактическому замеру резкого изменения нагрузки и генерации;
  - по контролю величины и скорости отклонения частоты;
- фиксация факта и величины сброса и наброса мощности на фидерах с большой нагрузкой;
- реализация УВ на отключение нагрузки;
- реализация дополнительных видов управляющих воздействий, например, на включение отопительной нагрузки (аналог электрического торможения).

# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

Одна из главных причин малого числа устройств отключения нагрузки в распределительных сетях – это высокие требования к каналам связи для ПА, см. ГОСТ Р 55105-2012 (ГОСТ 34045-2017) п.7.5-7.8, выполнение которых требует неадекватно высоких затрат.

Для магистральных сетей (ПС 220-750 кВ и узловых ПС 110 кВ) эти требования к организации каналов связи ПА оправданы, т.к. эти каналы связи используются для РЗА (ТО, ТУ).

Требования по быстродействию (п.7.7 ГОСТ) каналов ПА также определяются задачей обеспечения динамической и статической устойчивости. При этом критическое время реализации конкретных УВ должно быть определено путем выполнения соответствующих расчетов электромеханических переходных процессов.

# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

В распределительных сетях имеются случаи аварийной перегрузки ЛЭП и трансформаторов, случаи недопустимого снижения напряжения.

Время реализации УВ на ОН при перегрузке оборудования от АОПО, то минимальная уставка по времени этих устройств отстроена от длительности КЗ (отключаемого резервными защитами с учетом времени УРОВ), длительности циклов АПВ и составляет секунды или даже десятки секунд.

Согласно ПТЭ для масляных автотрансформаторов допустима следующая перегрузка: до 20 мин при менее чем 75% перегрузке, до 10 мин при менее чем 100% перегрузке.

**Какой смысл устанавливать требования к времени передачи команды ОН при перегрузке трансформатора не более 25 мс, если допустимое время перегрузки исчисляется десятками минут?**



# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

Для распределительных сетей требования явно избыточны. Стоимость организации дублированных и независимых каналов связи по ВОЛС или ВЧ может превышать стоимость строительства ЛЭП 0,4-10 кВ. Соответственно если необходимо реализовать АОПО для трансформатора 10/0,4 кВ или 35/10 кВ, то эти требования приводят к отказу собственников от установки устройства АОПО.

В распределительных сетях имеет место абсурдная ситуация, задачи автоматического противоаварийного управления в соответствии с ГОСТ имеются, но они не решаются и чаще всего просто не замечаются, так как выполнить требования п.7.5-7.8 стандарта экономически нецелесообразно, а организацию каналов с менее высокими показателями ГОСТ не допускает.

# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

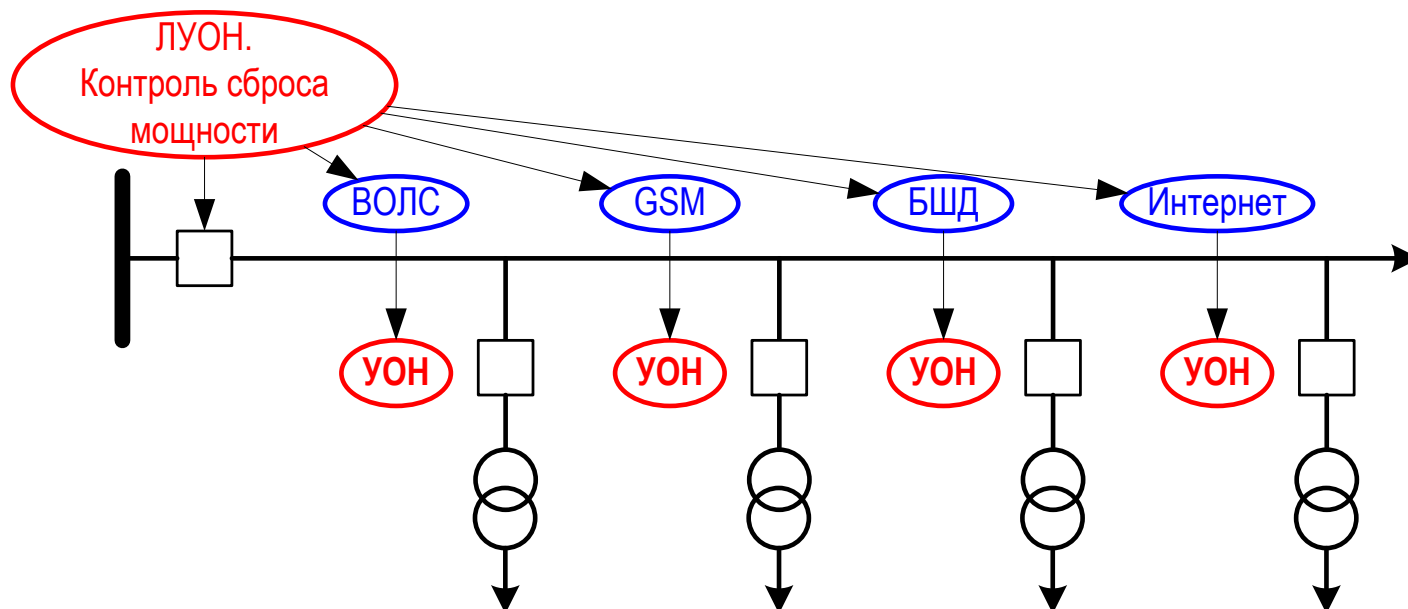
Возможным вариантом решения вышеописанной проблемы является обязательное исполнение существующих требований п.7.5-7.8 ГОСТ только для сетей 220 кВ и выше с проектным определением и обоснованием требований к каналам связи для сетей 110 кВ и ниже.

Соответственно для сетей 110 кВ и ниже требования ко времени передачи команды отключения нагрузки согласовывать с уставками по времени ПА (АОПО, АОСН, АПНУ).

А требования по надежности каналов и их дублирования для АОПО нивелируются возможностью отключения перегруженного элемента в соответствии с п.5.7.3 ГОСТ, что гарантирует выполнение задачи ограничения перегрузки даже при отказе каналов связи.

# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

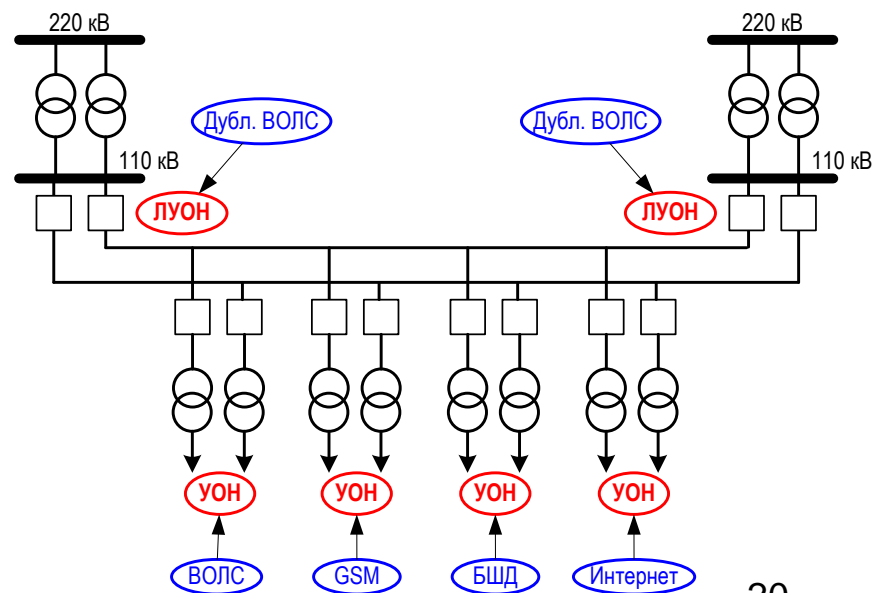
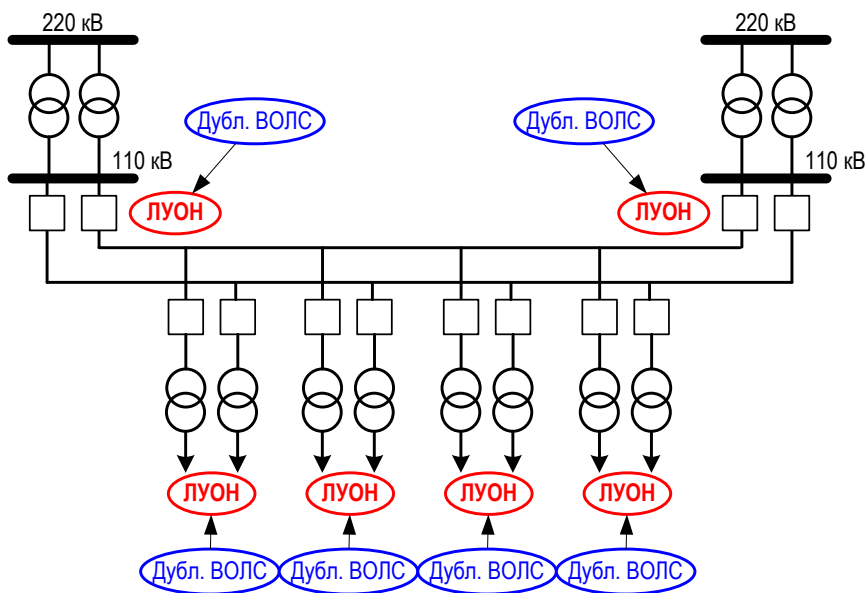
Для отключения нагрузки в распределительных сетях 35 кВ и ниже предлагается использовать любые существующие каналы связи (в т.ч. сотовой). Устройство, установленное в центре питания, посылает команду отключения, одновременно контролируя сброс нагрузки в голове фидера. Если за требуемое время не произошла разгрузка в требуемом объеме, то можно отключить фидер целиком.



# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

В сети 110 кВ предлагается два варианта решения задачи отключения нагрузки:

- организация дублированных каналов до каждой ПС;
- организация дублированных каналов только до узловых ПС, а до остальных предлагается использовать любые существующие каналы.



# Отключение нагрузки от ПА в распределительных сетях

Предлагаемый подход по организации каналов связи для распределительных сетей позволит решить целый спектр задач противоаварийного и режимного управления, что обеспечит экономический эффект:

- Создание АОПО, в том числе для ликвидации пиковой перегрузки при маловероятном совмещенном максимуме нагрузки.
- Управление сетями при их перегрузке:
  - автоматическое изменение точки раздела в кольцевых схемах;
  - автоматический алгоритм «веерного отключения».
- Снижение требований к избыточности (резервированию) при обеспечении нормативов по надежности за счет автоматического ограничения потребления при перегрузке сети, что приведет в результате к снижению капитальных затрат на электросетевое строительство для подключения новых потребителей..