



Инженерный центр  
«Автоматизация  
ресурсосберегающих  
технологий»  
[www.ic-art.ru](http://www.ic-art.ru)

*Публикации специалистов  
Инженерного центра «АРТ»*

## Системы частотного регулирования с крупными и высоковольтными электродвигателями

*Зобов Игорь Борисович, к. т. н., Малиновский Олег  
Владимирович, Лапшина Александра Анатольевна*

Опубликовано в издании  
“ТЕПЛОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”,  
информационный бюллетень № 2 (47) 2007, специальный выпуск  
“Системы частотного регулирования на объектах городского  
хозяйства и промышленности”

Офис Инженерного центра «АРТ»

195196, г. Санкт-Петербург, Таллинская ул., д. 7, литер «А»

Офисный центр «К12». Офис 2-Н

+7 (812) 445-24-22; 445-24-76; 445-23-47

e-mail: [office@ic-art.ru](mailto:office@ic-art.ru)

[www.ic-art.ru](http://www.ic-art.ru)



YouTube Канал «Инженерный центр «АРТ»

## СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С КРУПНЫМИ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Зобов Игорь Борисович, к. т. н., Малиновский Олег Владимирович,  
Лапшина Александра Анатольевна

Мировой рынок преобразователей частоты номинальной мощностью более 500 кВт в 2007 году оценивается в 250 млн. дол. США. Это всего 4% от общего объема продаж. Доля продаж крупных ПЧ в «штуках» и того меньше; она не дотягивает до 1%.

В связи с этим возникает вопрос: есть ли смысл вообще рассматривать системы частотного регулирования с крупными электродвигателями?

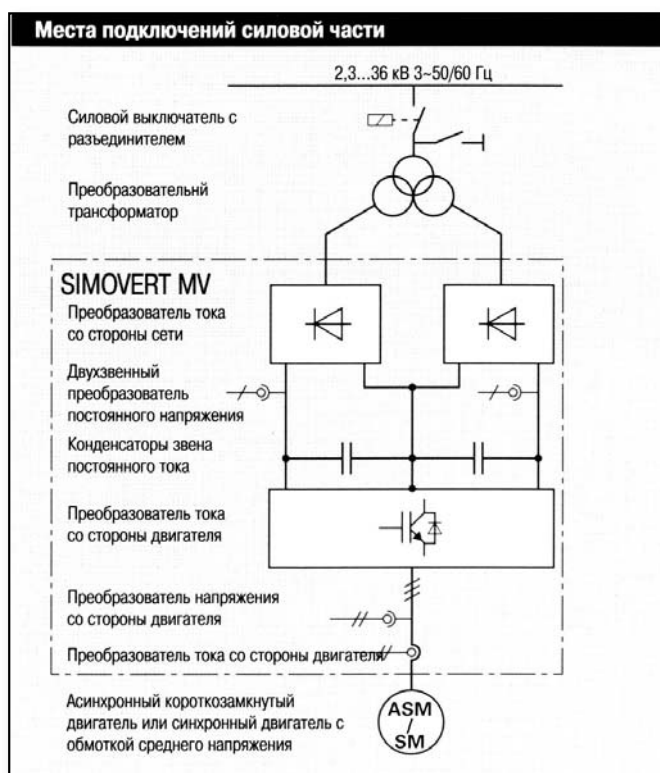
Не готовы отвечать за весь мир, но для сегодняшних российских условий смысл, безусловно, есть. Приведем лишь один пример.

Предприятие «Водоканал» города с пяти-миллионным населением реализовало две программы установки преобразователей частоты на насосных станциях. Сегодня на ПНС, КНС и объектах спецтехнологий работает более 500 ПЧ мощностью от 4 до 315 кВт. Эффект от их работы явный и положительный. Вместе с тем, в масштабах предприятия все насосные станции с

низковольтными электродвигателями потребляют лишь 7% электроэнергии. Это не соизмеримо с той долей энергопотребления, которая приходится на насосные агрегаты и воздуходувки с электродвигателями мощностью от 400 кВт до 5 МВт.

В России большинство электродвигателей мощностью 400 кВт и выше (их мы отнесем к «крупным») высоковольтные. Это существенно усложняет технические решения систем частотного регулирования. Иногда можно встретить высоковольтные синхронные машины с независимым возбуждением мощностью менее 300 кВт. В странах Западной Европы, напротив, электродвигатели мощностью до 1 МВт большей частью имеют напряжение 400–690 В, что обуславливает различия в решениях по применению частотно-регулируемого электропривода.

В чем же особенности систем частотного регулирования с крупными электродвигателями?



SIEMENS



Рис. 1. Пример высоковольтного преобразователя частоты с силовым входным трансформатором

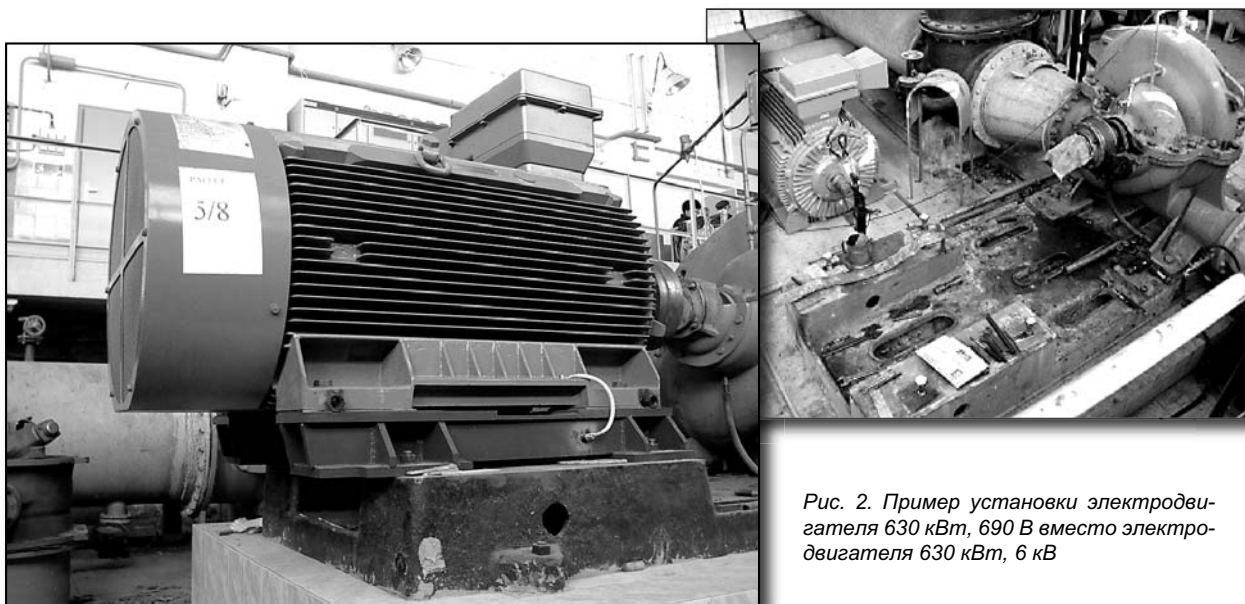


Рис. 2. Пример установки электродвигателя 630 кВт, 690 В вместо электродвигателя 630 кВт, 6 кВ

Можно утомить читателя перечислением десятков технических деталей, но главное, по нашему мнению, состоит в сложности и объеме инженерных задач, которые приходится решать при реализации проектов низковольтных и высоковольтных СЧР.

Сегодня большинство конечных пользователей могут самостоятельно выбрать и приобрести приличный низковольтный преобразователь частоты, смонтировать его, запустить и организовать текущую эксплуатацию. Заказчик прекрасно видит, где однозначно требуется частотное регулирование. Доступные сегодня

Руководства пользователя ПЧ содержат массу рекомендаций и примеров по установке и подключению оборудования. Заводские макропрограммы преобразователей позволяют пуско-наладку электропривода вести по принципу «plug and play», а премудростям текущей эксплуатации ПЧ можно научиться у коллег.

Все не так просто, если речь идет о частотном регулировании агрегатов с крупными и высоковольтными электродвигателями. Здесь приходится принимать во внимание целый ряд факторов.

**Высокая ответственность за выбор технологической подсистемы и обеспечение параметров технологических процессов**

Никто не гарантирован от ошибок. Однако последствия неверных решений при создании СЧР, скажем, станции «подкачки» на водопроводной сети носят чаще всего локальный характер. Напротив, остановка станции первого или второго подъема, от которой получает воду полгорода, котельные, ТЭЦ и др., вряд ли пройдет незамеченной. В этой связи, выбирая объект применения «частотного регулирования» с высоковольтными приводными электродвигателями, конечный пользователь должен быть абсолютно уверен, что все будет



Рис. 3. Пример СЧР по схеме «трансформатор – низковольтный преобразователь частоты – повышающий трансформатор»

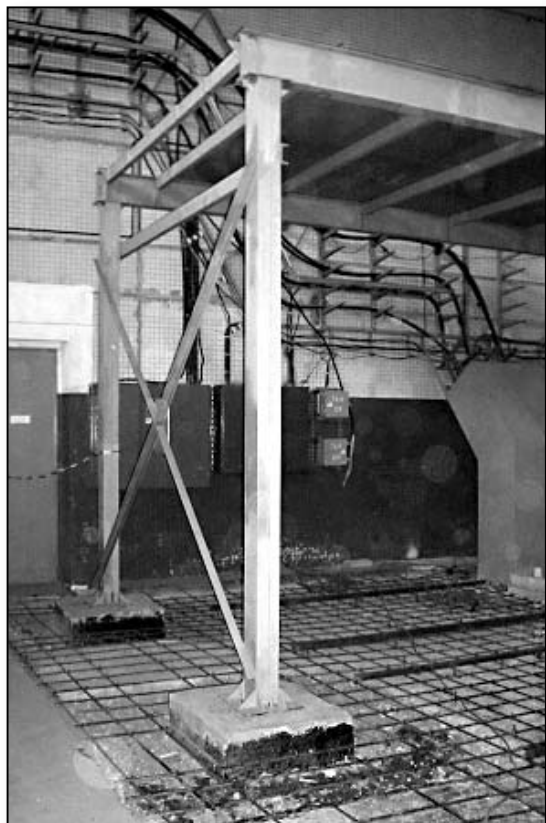


Рис. 4. Пример установки металлоконструкций для размещения оборудования преобразовательного звена СЧР

работать и принесет ожидаемый технико-экономический эффект.

#### **Неоднозначность решения по выбору оборудования преобразовательного звена**

Какой бы фирме ни отдал предпочтение покупатель низковольтного ПЧ, он получит двухзвенный преобразователь с автономным инвертором напряжения, собранный из доступных компонентов. Разница будет в платах управления и программном обеспечении (здесь мы намеренно опускаем очень важные вопросы качества, документации, сервиса и др.).

Напротив, технические решения систем частотного регулирования крупных электроприводов различаются принципиально.

При наличии высоковольтного приводного электродвигателя первым естественным желанием будет применить преобразователь частоты с выходным напряжением 6 (10) кВ.

Сегодня существует более десятка топологий преобразования электроэнергии в «высоковольтных» ПЧ, реализованных в изделиях зарубежных и отечественных производителей. Многие из них разрабатывают собственную элементную базу электронных ключей в инверторах. Общим является то, что термин «вы-

соковольтные», примененного которого фирмы стремятся подчеркнуть отсутствие выходного повышающего трансформатора. При этом не акцентируется внимание на том, что на входе преобразовательного звена в большинстве случаев трансформатор все же используется (рис. 1).

Однако может оказаться, что диапазон номинальных мощностей приглянувшегося заказчику высоковольтного ПЧ выше мощности приводного электродвигателя. Некоторые зарубежные фирмы, ориентируясь на национальный рынок, не поставляют преобразователи, скажем, 6 кВ, 400 кВт. Еще более вероятна ситуация, когда срок поставки окажется 6 месяцев, а цена неприятно удивит.

Второй вариант – отважиться заменить приводной высоковольтный электродвигатель на аналогичный с напряжением 0,4 или 0,69 кВ и реализовать простую и понятную схему «трансформатор – низковольтный преобразователь – низковольтный электродвигатель». Данный вариант особенно привлекателен, если на объекте имеются свободные мощности на низком напряжении. Это позволит отказаться от повышающего трансформатора и сохранить возможность прямого пуска электродвигателя на случай отказа ПЧ.

Проблемы могут возникнуть, если замена электродвигателя потребует переделки существующего фундамента (фото на рис. 2).

Компромиссным решением часто оказывается применение схемы «трансформатор – низковольтный преобразователь (0,4 или 0,69 кВ) – повышающий трансформатор» (фото на рис. 3). В практике Инженерного центра «АРТ» она сегодня является основной.

Таким образом, выбирая оборудование для частотного регулирования крупных и высоковольтных электроприводов, заказчик должен ориентироваться в десятках существующих на рынке предложений и не поддаваться на уговоры продавцов оборудования без всестороннего технико-экономического обоснования.

#### **Значительный объем проектирования**

СЧР станции «подкачки», упомянутой выше, можно сделать без проекта (запросив у поставщика паспорт и руководство пользователя). Это нежелательно, но возможно.

Для СЧР с крупными и высоковольтными электродвигателями такое решение связано с большим риском.

Как правило, проекты предполагают разделы «Электроснабжение», «Релейная защита», «Отопление и вентиляция», «КИПиА», сметные расчёты и как минимум «Задание на особо-



Рис. 5. Пример производства электромонтажных работ при установке оборудования СЧР

строительные работы». Проектно-сметная документация проходит экспертизу и согласование. К разработке документации часто привлекаются специализированные организации, в том числе представители поставщика преобразователей частоты.

#### **Значительный объем общестроительных работ**

Оборудование преобразовательного звена (ОПЗ) достаточно громоздкое. Для его размещения может потребоваться перепланировка помещений. При весовой нагрузке в несколько тонн необходимо думать о фундаментах, усилении перекрытий и др. При размещении высоковольтного оборудования следует учитывать дополнительные требования, связанные с обеспечением электробезопасности. Объем и стоимость строительных работ сильно зависят от общего инженерного решения системы частотного регулирования (фото на рис. 4).

#### **Сложность организации теплоотвода**

Предположим, конечный пользователь применил систему с преобразователем частоты

мощностью 1 МВт. При работе с номинальной нагрузкой можно рассчитывать примерно на 2% потерь в ПЧ и 1,5–2% в трансформаторе. Это уже 35–40 кВт. Если используется двухтрансформаторная схема, то надо добавить 1,5% на повышающем трансформаторе и не забыть учесть нагрев синусоидального фильтра.

При небольшом объеме помещения удаление теплоизбытков превращается в самостоятельную инженерную задачу, решение которой потребует определенных расходов.

#### **Значительный объем электромонтажных работ**

В структуре цены СЧР с крупными и высоковольтными электродвигателями стоимость оборудования преобразовательного звена (ОПЗ) значительна. Это заставляет принимать решения, минимизирующие количество комплектов ОПЗ. Во многих случаях оказывается целесообразным обеспечить подключение к одному комплекту двух, трех и более электродвигателей. Это влечет за собой работы в распределительном устройстве 6 (10) кВ, включая установку



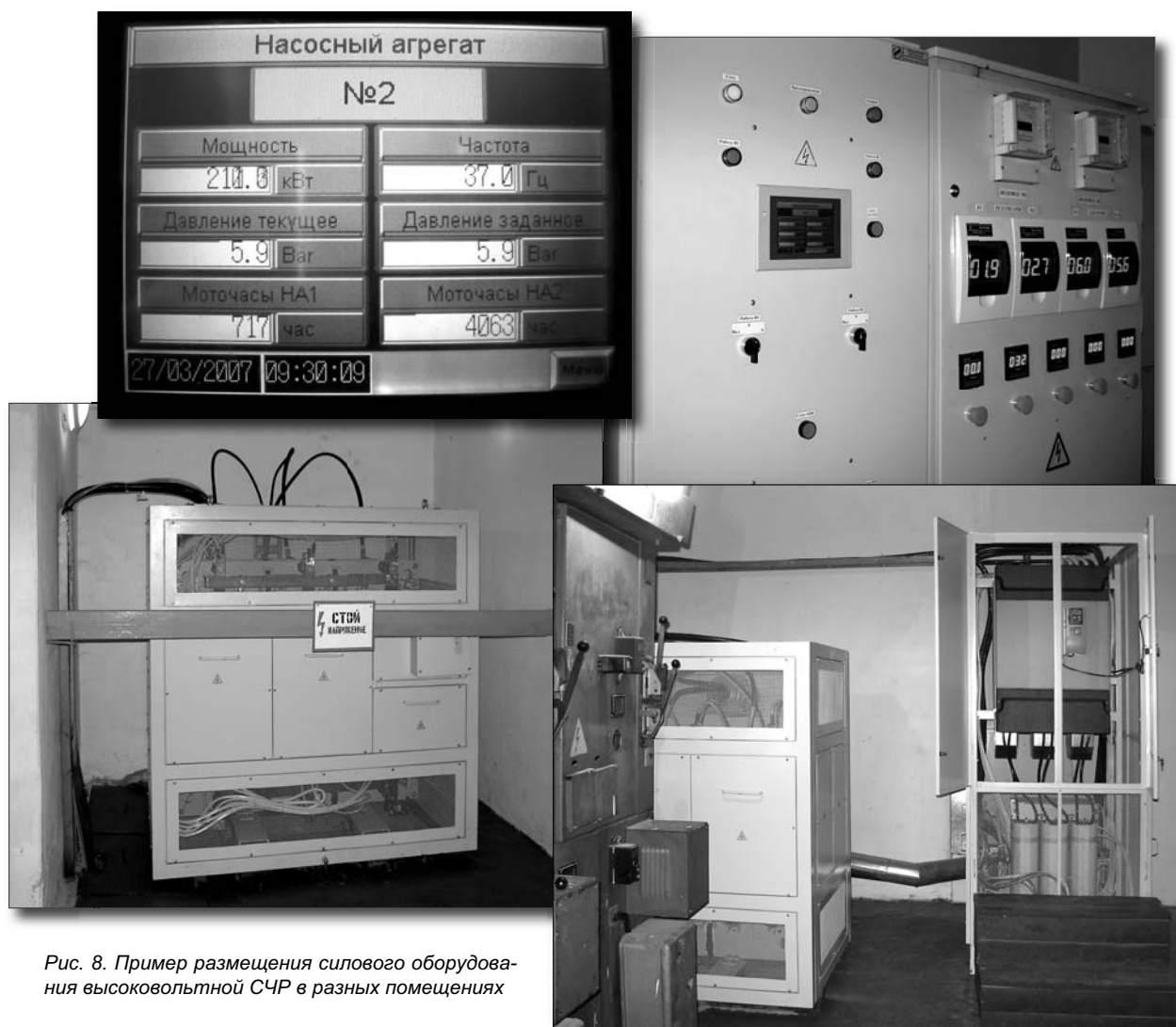


Рис. 8. Пример размещения силового оборудования высоковольтной СЧР в разных помещениях

### **Сложность комплексного опробования**

Согласно СНиП 3.05.06-85, «в период комплексного опробования обслуживание электрооборудования осуществляется заказчиком».

Тут наступает момент истины.

Об этом моменте заказчик думает в самом начале работы и определяет, «кто будет нажимать кнопку и отвечать за последствия».

Представьте себе, что проектно-сметная документация не разрабатывалась, преобразователь мощностью 1 МВт купил собственный отдел снабжения, кабели проложил «свой» электроцех, а сколько нужно преобразователей и какой мощности, решил начальник электрослужбы. Что делать, если при пуско-наладке все «электрическое» заработало, а технологов работа оборудования не устраивает? Например, не тот диапазон регулирования расхода?

Некоторые заказчики в этом случае подают иск в арбитраж, обвиняя поставщика преобразователя частоты. Удачи им!

### **Необходимость менеджмента проекта**

В проектах СЧР с крупными и высоковольтными электродвигателями принимают участие много людей и организаций. Как правило, предполагается взаимодействие специалистов разных предметных областей – электроснабжение, преобразовательная техника, электропривод, АСУ ТП, при обязательном участии представителей эксплуатирующей организации. Некоторые специалисты вполне могут не владеть русским языком.

Сроки изготовления элементов оборудования преобразовательного звена значительны. Для низковольтных ПЧ это 4...8 недель; для сухих трансформаторов 10...14 недель; для высоковольтных ПЧ – от полугода и более. вполне вероятно, что оборудование будет поставляться из-за границы и потребуются оформление таможенных документов.

Ввод в эксплуатацию системы удобно производить в определенное время. Для объектов



Рис. 9. Пример размещения силового оборудования высоковольтной СЧР в разных уровнях

теплоснабжения это обычно межотопительный период. Для промышленного предприятия – период остановки на профилактику технологической установки и др. К согласованному сроку все должно быть готово.

Перечисленные особенности обуславливают необходимость профессионального менеджмента проекта. Не говоря уже о том, что стоимость проектов СЧР с крупными и высоковольтными электродвигателями выражается в миллионах рублей.

#### **Организация сервиса и технической поддержки**

Предположим, проект завершен успешно. Означает ли это, что конечный пользователь может спокойно пожинать плоды и в течение 10–15 лет получать дополнительную прибыль от вложенных в «частотное регулирование» средств?

Нет, по крайней мере, до тех пор, пока он не организует плано-предупредительный осмотр и плано-предупредительный ремонт и не поймет, как будет осуществляться ремонт преобразователя частоты в случае возможных отказов.

К сожалению, организация фирменного сервиса высоковольтных преобразователей в России сегодня редкость.

Почему мы уделяем столько внимания проектам, в которых предполагается частотное регулирование агрегатов с крупными и высоковольтными электродвигателями?

Дело в том, что при подготовке этих проектов основные дебаты часто разворачиваются вокруг типа ПЧ или наименования фирмы-производителя.

Самый частый вопрос в ходе дебатов: «А какие частотники вы предлагаете?».

Мы считаем, что серьезная инженерная задача не должна сводиться к выбору одного, хотя и очень важного, компонента. Кроме того, при использовании двухтрансформаторной схемы тип преобразователя частоты вообще имеет второстепенное значение.

Схема «трансформатор – низковольтный преобразователь (0,4 или 0,69 кВ) – повышающий трансформатор» имеет немало достоинств в плане построения СЧР, а именно:

- единая топология «двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения»;
- диапазон мощностей преобразователей от нескольких ватт до 5 МВт (мощностной ряд высоковольтных ПЧ всегда ограничен снизу, например 400...500 кВт при 6 кВ; 800...1000 кВт при 10 кВ);
- основные элементы (трансформаторы, преобразователь, фильтры) стандартные;
- высокая надёжность (наработка ПЧ на отказ составляет 60–100 тыс. ч.; трансформаторов и фильтров – значительно больше);
- большой опыт производства и применения низковольтных ПЧ (30–40 лет);
- обслуживание оборудования не требует уникальных знаний;
- складской резерв ЗиП не требуется, поскольку большинство семейств низковольтных ПЧ поддерживаются сервисными центрами на территории России;
- для сетей напряжением 6 кВ и 10 кВ могут применяться одинаковые ПЧ, что удобно для предприятий, применяющих оба уровня напряжения.

Недостатки данного варианта связаны с наличием второго (повышающего) трансформатора. Прежде всего, это дополнительные потери (1,5–2% от установленной мощности трансформатора). Однако, если посчитать «цену вопроса», то окажется, что дополнительные

издержки на оплату «потерянной» электроэнергии меньше или равны стоимости услуг по текущему обслуживанию высоковольтного преобразователя частоты. Другими словами, в деньгах разницы нет.

С точки зрения создания систем частотного регулирования, есть как минимум три аргумента в пользу использования «двухтрансформаторных» схем:

- гибкость инженерных решений;
- простота поддержки в течение всего срока полезного использования;
- конкурентная цена.

#### **Гибкость инженерных решений**

Базовое компоновочное решение СЧР с высоковольтными приводными электродвигателями (показано на рис. 6), где все оборудование преобразовательного звена расположено в одном помещении. Соответствующая силовая электрическая схема – на рисунке 7.

При отсутствии свободного места силовое оборудование легко размещается в разных помещениях (фото на рис. 8), что часто оказывается нерешаемой проблемой для высоковольтных ПЧ.

Кроме того, возможна компоновка ОПЗ в разных уровнях. Так, на крупной насосно-перекачивающей станции (НПС) шесть трансформаторов установлены на уровне пола, а три преобразователя частоты мощностью по 500 кВт с синусо-

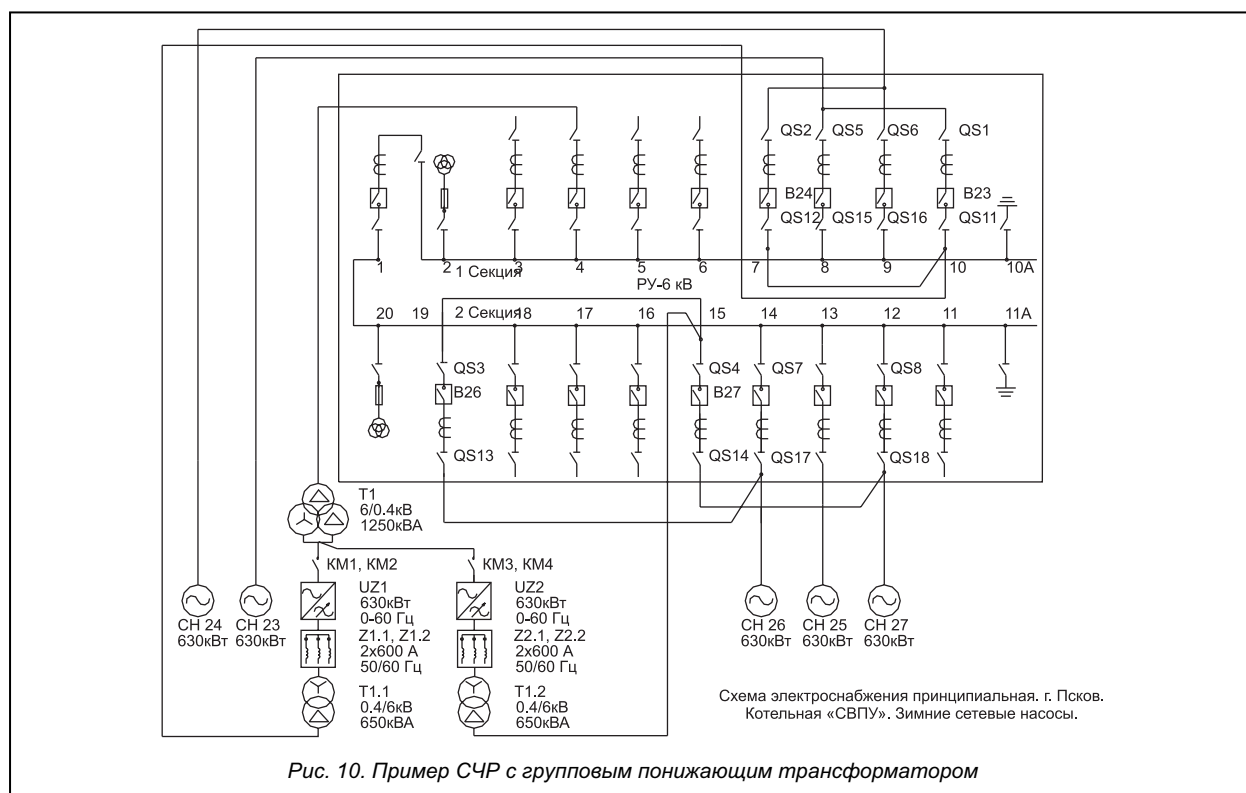


Рис. 10. Пример СЧР с групповым понижающим трансформатором

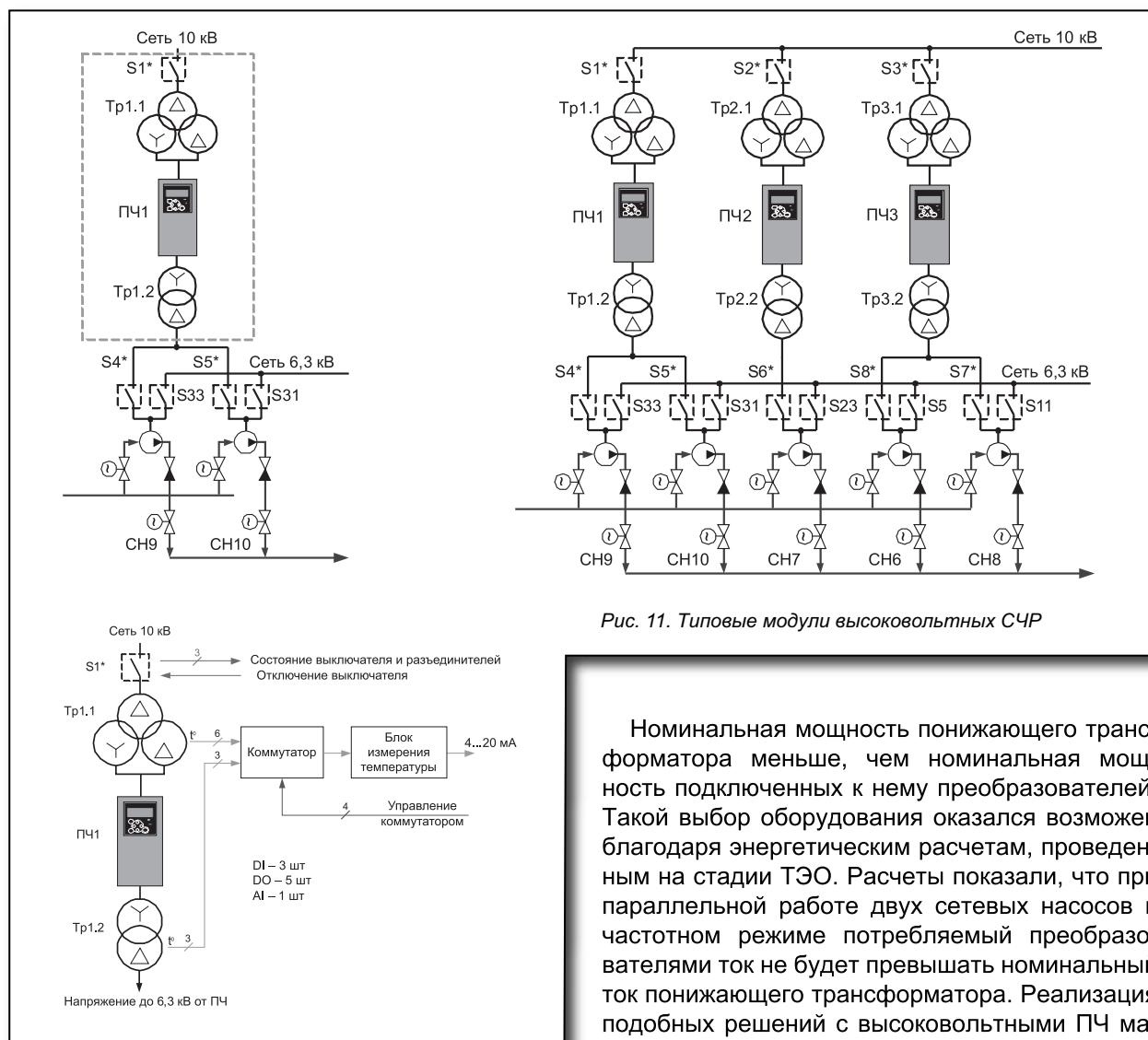


Рис. 11. Типовые модули высоковольтных СЧР

идальными фильтрами – над ними на металлоконструкциях (фото на рис. 9).

Это позволило «вписаться» в существующий строительный объем и сократить протяженность кабелей. При использовании в данном проекте высоковольтных ПЧ пришлось бы сооружать пристройку к зданию НПС или располагать рядом с ним контейнеры. Цена проекта была бы существенно выше.

Двухтрансформаторные схемы позволяют гибко подходить к выбору мощности силового оборудования. Так, СЧР сетевой установки крупной котельной обеспечивает параллельную работу в «частотном» режиме двух насосных агрегатов СЭ 1250/125. Для этого применены два преобразователя по 630 кВт и два повышающих трансформатора. Понижающий трансформатор используется один, мощностью 1250 кВА (рис. 10).

Номинальная мощность понижающего трансформатора меньше, чем номинальная мощность подключенных к нему преобразователей. Такой выбор оборудования оказался возможным благодаря энергетическим расчетам, проведенным на стадии ТЭО. Расчеты показали, что при параллельной работе двух сетевых насосов в частотном режиме потребляемый преобразователями ток не будет превышать номинальный ток понижающего трансформатора. Реализация подобных решений с высоковольтными ПЧ маловероятна.

Двухтрансформаторные схемы легко решают задачу согласования уровней напряжения источника и электродвигателя. Так, например, питающее напряжение может быть 10 кВ, а включенные в СЧР электродвигатели – 6 кВ и 10 кВ. В случае «высоковольтного» решения должны быть применены два разных изделия для уровней напряжения 6 кВ и 10 кВ.

Гибкость схемных и компоновочных решений сочетается с унификацией модулей высоковольтных СЧР (рис. 11).

Такие модули, кроме собственно частотного регулирования, осуществляют:

- блокировки работы электропривода в частотном режиме и в режиме прямого пуска от сети;
- автоматический ввод резерва;
- контроль и управление технологическими задвижками в переходных режимах работы насосных агрегатов;

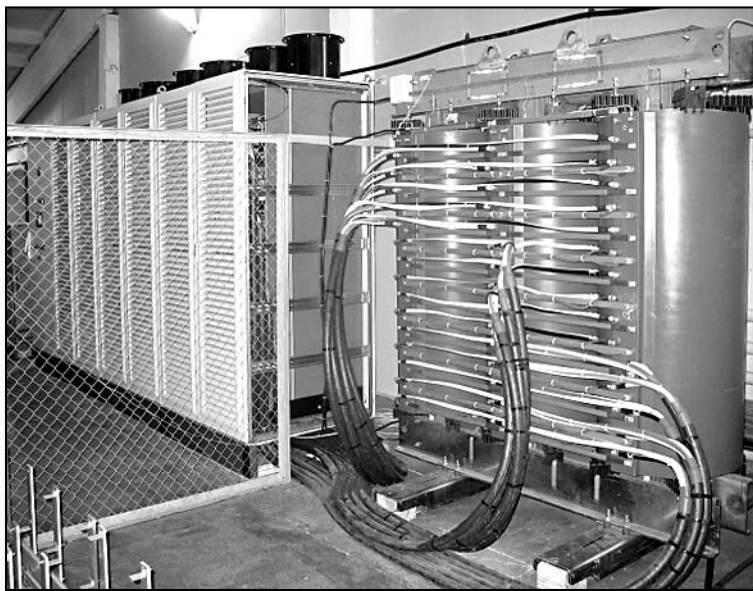


Рис. 12. Пример согласующего многообмоточного силового трансформатора высоковольтного преобразователя частоты

- контроль состояния трансформаторов;
- защиту трансформаторов от перегрева;
- отключение ПЧ в случае аварии;
- контроль состояния коммутационных аппаратов;
- предупреждение несанкционированных переключений в силовых цепях электропривода;
- формирование предупредительных и аварийных сообщений;
- контроль готовности гидравлической магистрали к работе;
- приведение гидравлической магистрали насоса в рабочее состояние при пуске и возвращение в исходное состояние при остановке;
- плавный разгон и остановку насосных агрегатов без гидравлических ударов и «стуков» обратных клапанов.

**Простота поддержки в течение всего срока полезного использования**

Понижающий и повышающий трансформаторы являются стандартными элементами, обслуживание которых регламентировано ПТЭ.

В случае выхода из строя силового трансформатора, новый может быть заказан на десятке отечественных заводов и установлен силами

заказчика. Этого нельзя сказать о согласующем трансформаторе высоковольтного ПЧ (фото на рис. 12). При проблемах с ним придется обратиться к поставщику ПЧ, который, с большой долей вероятности, окажется за рубежом.

Эксплуатация низковольтного преобразователя частоты не требует привлечения специалистов заводов-изготовителей и может осуществляться персоналом заказчика после расширенного инструктажа. Специфических приборов и программных продуктов также не требуется. Напротив, текущее обслуживание высоковольтных ПЧ требует особых знаний и навыков.

Низковольтный преобразователь частоты ремонтпригоден даже при самых тяжелых авариях.

Специалистам Инженерного центра «АРТ» пришлось восстанавливать преобразователь мощностью 630 кВт на крупной насосной станции в Республике Беларусь. Последствия аварии оказались таковы, что целым осталось практически только железо (фото на рис. 13).

Разборка и дефектация преобразователя, поставка ЗИП, сборка, тестирование, ввод в эксплуатацию заняли **три дня!** Восстановление любого высоковольтного ПЧ после аналогичной аварии в такие сроки проблематично.



Рис. 13. Пример последствий аварии преобразователя частоты мощностью 630 кВт

Сегодня на складе Инженерного центра в Санкт-Петербурге поддерживается резерв ЗИП в объеме более 200 наименований, что позволяет ремонтировать преобразователи частоты мощностью до 1,6 МВт в течение 2...3 дней.

Если при аварии низковольтного ПЧ пользователь по какой-либо причине не захочет его ремонтировать, всегда есть возможность приобрести изделие той же мощности и напряжения в десятке фирм и установить его взамен отказавшего. Трансформаторы, фильтры, кабели и др. при этом менять не надо.

При желании заменить высоковольтный ПЧ придется менять все.

Таким образом, простота технической поддержки оборудования дает конечному пользователю свободу от поставщика и возможность эксплуатировать систему с разумными издержками.

### **Конкурентная цена**

При сложившихся сегодня ценах в России на электротехническую продукцию, комплект оборудования «трансформатор – низковольтный преобразователь – повышающий трансформатор» оказывается дешевле «высоковольтного»

преобразователя вплоть до номинальной мощности 2–2,5 МВт. При сопоставлении издержек на полный комплекс работ, от проектирования до пуска-наладки, «двухтрансформаторный» вариант оказывается еще более привлекательным. Аналогичное соотношение имеет место и для затрат на проведение ППО и ППР.

Системы частотного регулирования с крупными и высоковольтными электродвигателями, как правило, оказываются достаточно сложными и дорогими. Реализация таких проектов конечным пользователем без привлечения специализированных организаций связана с высоким риском. С другой стороны, любому подрядчику трудно выполнить свою работу без участия специалистов эксплуатационных подразделений заказчика. Оптимальным является взаимодействие обеих сторон на всех этапах – от ТЭО до ввода системы в эксплуатацию.

Опыт Инженерного центра «АРТ» по разработке и реализации десятков подобных проектов показывает, что именно СЧР с крупными и высоковольтными электродвигателями позволяют конечному пользователю получить максимальный технико-экономический эффект.