# ВЫБОР ТИПА, СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

АВТОР:

В.К. ФОКИН,
К. Т. Н.,
АО « НТЦ ФСК ЕЭС»

**Емкостная компенсация реактивной мощности в электрических сетях переменного тока широко используется для повышения эффективности работы электрооборудования и снижения потерь электроэнергии. Внедрение соответствующего оборудования повышает пропускную способность и динамическую устойчивость воздушной линии.**

***Ключевые слова:*** устройства продольной емкостной компенсации (УПК); системы автоматического регулирования; законы регулирования.

Устройства продольной емкостной компенсации способствуют повышению пропускной способности протяженных линий электропередачи



## ВВЕДЕНИЕ

Устройства продольной емкостной компенсации (УПК), как неуправляемые (НУПК), так и управляемые (УУПК), используемые в электрических сетях переменного тока напряжением 500 кВ и выше самостоятельно либо в составе так называемых гибких электропередач переменного тока (ГЭПТ, или по англ. FACTS), позволяют:

- существенно повысить пропускную способность электрических связей с требуемыми запасами статической и динамической устойчивости;
- перераспределить потоки мощности по линиям внутри сечений между энергосистемами, а также между параллельными линиями в электрических сетях, обеспечивая допустимую и оптимальную загрузку линий и уменьшая потери электрической энергии;
- нормализовать уровни напряжения электрической сети, особенно при наличии протяженных электропередач;
- обеспечить эффективное демпфирование электромеханических колебаний между энергосистемами;

Кроме того, применение УПК позволяет отказаться от сооружения дополнительных линий, что снижает стоимость передачи электроэнергии.

Отличие неуправляемых от управляемых УПК состоит в следующем: в НУПК изменение схемы и параметров устройства происходит при его обесточенном состоянии, т.е. при кратковременном отключении от сети, что ограничивает выполнение перечисленных выше свойств УПК; в УУПК изменение емкостного сопротивления устройства может производиться вручную (в том числе дистанционно) или автоматически — с помощью регуляторов без отключения компенсатора от сети, в полной мере реализуя приведенные выше свойства.

Устройства продольной компенсации, как неуправляемые, так и управляемые, широко используются в зарубежных энергосистемах [1, 2]. В нашей стране УПК имеет весьма ограниченное применение, но согласно [2] разработаны технические предложения по использованию этих устройств в энергосистемах Урала, Сибири и Дальнего Востока.

По мнению авторов этой статьи, в настоящее время сдерживающими факторами в части применения УПК в ЕЭС России являются низкие перетоки мощности по большинству протяженных высоковольтных линий передач напряжением 500 кВ и выше и отсутствие потребности в наращивании мощностей по имеющимся в нашей стране линиям из-за продолжающегося длительного спада промышленного производства.

Основные факторы, ограничивающие применение последовательных конденсаторов, хорошо известны — это повышенные уровни токов КЗ, опасность возникновения асинхронного самовозбуждения находящихся вблизи от УПК электрических машин или субгармонических электромагнитных колебаний в сети, повышенные уровни напряжений при малых нагрузках по ВЛ, высокая стоимость управляемых устройств.

Задачами, стоящими перед системами управления и регулирования УПК, являются как успешная реализация отмеченных выше полезных свойств устройства, так и предупреждение и своевременное эффективное предотвращение отмеченных отрицательных явлений.

## ВЫБОР ТИПА УПК

По принятой классификации существуют два основных вида УПК —

### СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ОДНОГО БЛОКА НЕУПРАВЛЯЕМОГО УП

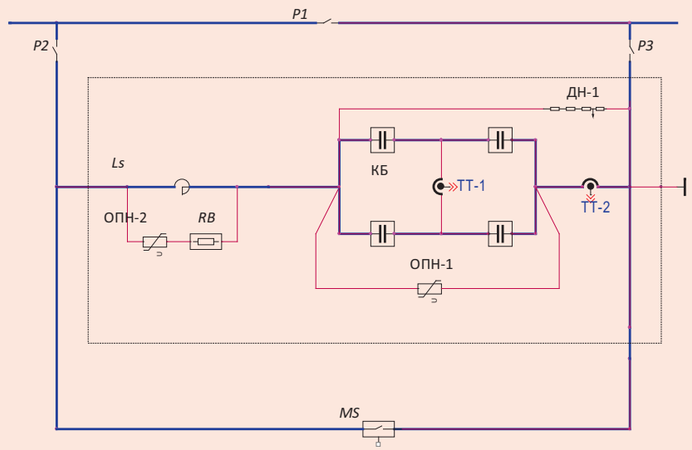



Рис. 1

неуправляемые (нерегулируемые) устройства (НУПК) и управляемые (регулируемые) (УУПК).

### НУПК

Структурная схема для фазы одного блока НУПК показана на рис. 1.

Здесь конденсаторные батареи (КБ) соединены по схеме с измерением небаланса токов (ТТ-1), разъединители (Р1–Р3) обеспечивают сборку схемы УПК, реактор LS ограничивает и сглаживает токи при коммутациях выключателем (MS); ограничители напряжений ОПН-1 и ОПН-2 снимают повышенные напряжения на КБ и реакторе LS. Делители напряжения ДН-1 и трансформаторы тока ТТ-1, ТТ-2 используются в системах регистрации и управления.

Неуправляемое УПК может состоять из нескольких блоков и быть оснащено всеми необходимыми защитами от повышенных напряжений, сверхтоков при перегрузках и при КЗ.

НУПК частично выполняет отмеченные выше полезные свойства функции УПК, обеспечивая повышенную пропускную способность и запас по устойчивости отдельных линий и сечения между энергосистемами в целом, а также заранее заданное перераспределение потоков активной мощности по параллельным связям. Как правило, эти устройства устанавливаются в серединах линий на электропередачах со стационарными установившимися режимами, когда нет необходимости в частых изменениях величины емкостной компенсации, т.е. частых переключений блоков или КБ в составе компенсирующего устройства, например, на месячном и сезонном интервалах времени.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УУПК-В

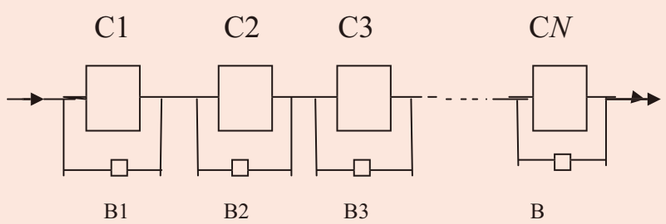



Рис. 2

## УПРОЩЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА МОДУЛЯ УУПК-ТК И УУПК-ТВ

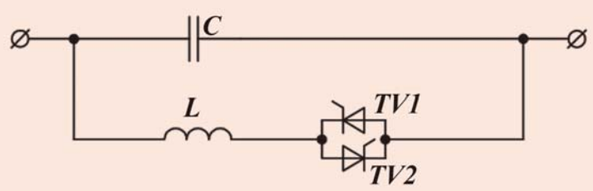



Рис. 3

### УУПК

Управляемые УПК подразделяются на три типа: ступенчатые, коммутируемые механическими выключателями УУПК-В (по международной терминологии — MSSC), ступенчатые, коммутируемые тиристорными ключами УУПК-ТК (TSSC), и плавно управляемые тиристорными вентилями УУПК-ТВ (TCSC).

### УУПК-В

УУПК-В содержит N модулей (рис. 2), каждый из которых имеет структурную схему, показанную на рис. 1. При этом отдельные модули конденсаторных батарей (С) коммутируются выключателями (В) с управляемой коммутацией, обладающими высоким коммутационным ресурсом. Такое УПК, в отличие от НУПК, может участвовать в управлении режимом работы сети или электропередачи на суточном и недельном интервале времени.

### УУПК-ТК И УУПК-ТВ

Упрощенная электрическая схема управляемых тиристорных устройств УПК для УУПК-ТК и УУПК-ТВ одинакова, она приведена на рис. 3, где С — базовая емкость конденсаторной батареи; L — индуктивность реактора; TV1 и TV2 — тиристорные вентили.

Различие УУПК-ТК и УУПК-ТВ заключается в принципе их работы. В первом используется ключевой режим работы тиристоров (ТК): шунтирование емкости С через небольшую индуктивность L. Во втором — УУПК-ТВ — используется



## ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УУПК ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ $X_C$ И $X_P$ ПРИ $X_{CMIN}$ = –11 Ом

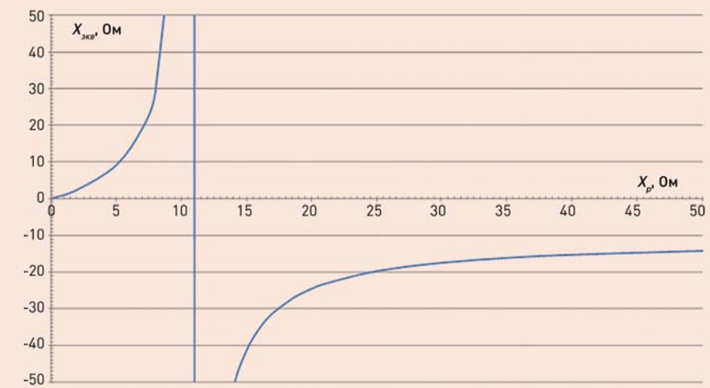



Рис. 4

идея изменяемого индуктивного сопротивления $X_p$ = var, включенного параллельно с конденсаторной батареей $X_c$:

$$X_{Срез.} = \frac{-X_P \times X_C}{X_P - X_C} \qquad (1)$$

Изменение $X_{Срез}$ или $X_{экв}$ в зависимости от $X_p$ показано на рис. 4.

В формуле (1) и на рис. 4 принято, что в индуктивном режиме величины $X_{экв}$ имеют знак плюс, а в емкостном режиме — знак минус.

При изменении $X_p$ от 0 до ∞ можно выделить два регулировочных диапазона для $X_{экв}$: при подходе к резонансной точке слева от $X_p$ = 0 до $X_p$ = $X_c$ результирующее сопротивление имеет индуктивный характер от $X_{экв}$ = $X_{pmin}$ = 0 до $X_{экв}$ = $X_{pmax}$ = +∞; при подходе $X_p$ к резонансной точке $X_p$ = $X_c$ справа результирующее реактивное сопротивление имеет емкостной характер с диапазоном изменения сопротивления $X_{экв}$ от –$X_{cmin}$ до $X_{cmax}$ = –∞.

Естественно, что реальный диапазон емкостного сопротивления для устройства УУПК-ТВ ограничен величиной K и выбирается из условия: $X_{cmax}$ / $X_{cmin}$ ≤ K, где $X_{cmin}$ = $X_c$ и $X_{cmax}$ по формуле (1) при соответствующем $X_p$. При этом на емкостном диапазоне изменения $X_{экв}$ наибольшая величина тока будет при $X_{экв}$ = $X_{cmax}$, которая в емкостной ветви (через $X_c$) составит $I_c$ = K$I_{вл}$, а в индуктивной ветви УУПК (через $X_p$) — $I_p$ = (K – 1) $I_{вл}$, где $I_{вл}$ — ток линии.

Рекомендуемые значения коэффициента K согласно [1] не должны быть более 3. Это объясняется тем, что с приближением $X_p$ к резонансной точке $X_c$ = $X_p$ недопустимо с позиции выбора оборудования увеличиваются кратности токов в ветвях $X_c$ и $X_p$ по отношению к току линии ($I_{вл}$), подтекающему к этой параллельной ветви. Например, при $X_c$ = –11 Ом для получения $X_{Cmax}$ = –27 Ом (K = 27/11 = 2,45) величина шунтирующего индуктивного сопротивления $X_p$ составит 18,56 Ом, а токи в указанных ветвях достигают $I_c$ = 2,45 $I_{вл}$ и $I_p$ = 1,45 $I_{вл}$.

Для рассматриваемого примера с тиристорными вентилями при фазовом управлении получить управляемый диапазон емкостной компенсации от $X_{C1min}$ = –11 Ом до $X_{C1max}$ = –27 Ом можно двумя путями:

а) использовать индуктивный реактор Xp = 18,56 Ом ($L_p$ = 59 мГн) и управляемый тиристор с углами зажигания $\alpha_1$ = 90° (ТВ открыт) до $\alpha_2$ = 180° (ТВ закрыт)[1], срабатывая в процессе управления ТВ весь широкий регулировочный диапазон $\alpha_1$ – $\alpha_2$ = 90° – 180°, при этом величина $X_{экв}$ изменяется от $X_{C1max}$ = –27 Ом до $X_{C1min}$ = –11 Ом;
б) использовать реакторы с меньшим номиналом $X_p$, выбранном на интервале 0 < $X_p$ < 11 Ом (или для индуктивности 0 < $L_p$ < 35 мГн), например, $X_p$ = 3 Ом ($L_p$ = 10 мГн). Однако в этом случае на емкостном диапазоне изменения $X_{Сэкв.}$ = [–11; –27] Ом используется не весь регулировочный диапазон углов зажигания ТВ. При $L_p$ = 10 мГн УУПК-ТВ будет работать с углами зажигания тиристора α в диапазоне 135° ÷ 180°, который еще больше сужается при меньших значениях $L_p$.

Второй путь представляется более предпочтительным, поскольку требуется меньшая установленная мощность реактора и можно реализовать индуктивный режим антикомпенсации при наиболее оптимальных

[1] Здесь принято, что угол α зажигания соответствующего тиристора отсчитывается от момента перехода напряжения на КБ через ноль (см. рис. 5).

## ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА КБ (А), ТОКОВ В ЛИНИИ (Б), В КБ (В) И В ТРГ (Г) ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ($X_{CMAX}$ = –27 Ом)

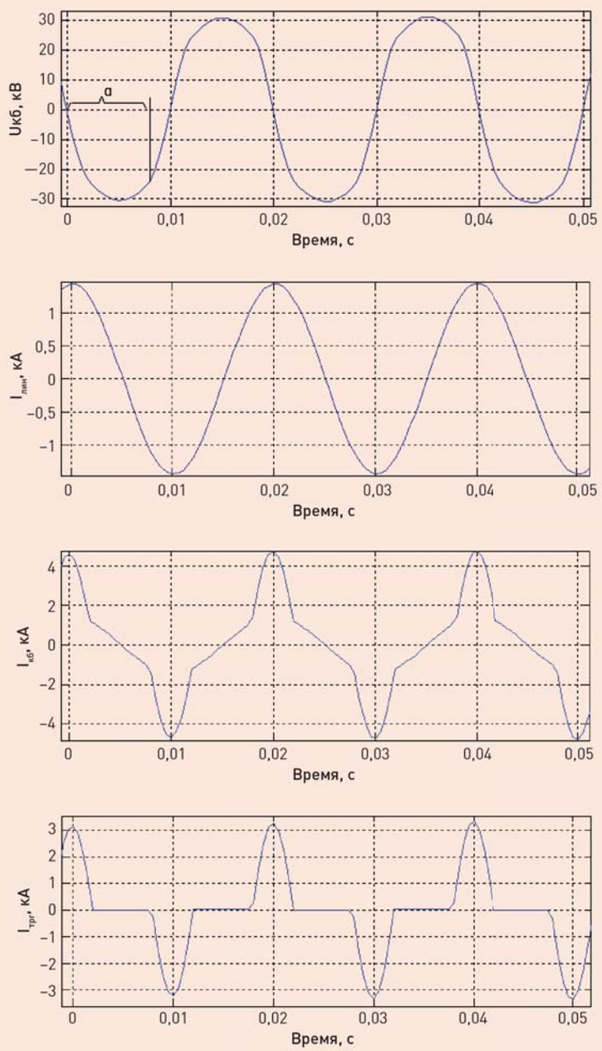



Рис. 5

для данного примера значениях индуктивного сопротивления $X_p$ = 2–3 Ом.

Применительно к упрощенной схеме (см. рис. 3) на рис. 5 (а, б, в, г) показаны осциллограммы напряжения на КБ ($U_{КБ}$), ток в линии ($I_{ВЛ}$), ток в ветви КБ ($I_{КБ}$) и ток в ветви «реактор — ТВ» ($I_{ТРГ}$) для случая использования $X_{L1}$ = 3 Ом (L1 = 10 мГн) при угле зажигания $\alpha_1$ = 135°, соответствующем $X_{Cmax}$ = –27 Ом. Из осциллограмм видно, что амплитуды мгновенных значений несинусоидальных токов в ветвях ТВ и КБ значительно превышают амплитуду тока ВЛ. Действующие значения токов в цепях ТВ и КБ при максимальном емкостном сопротивлении $X_{C1max}$ = –27 Ом превышают токи в линии соответственно в 2–3 раза.

На рис. 6 показана зависимость угла зажигания α от величины индуктивности реактора (L), при которых отрабатывается максимальное значение емкостного сопротивления $X_{Cmax}$ = –27 Ом при исходной величине $X_C$ = –11 Ом, а на рис. 7 — кратности действующих значений токов в ветвях C и L.

Из рис. 7 следует, что в режиме максимальной эквивалентной емкости УУПК-ТВ действующее значение токов в реакторе и тиристорных вентилях, конденсаторной батарее, как правило, в 2–3 раза выше, чем действующее значение тока линии электропередачи.

В отличие от УУПК-ТВ в схеме УУПК-ТК осуществляется ступенчатое регулирование сопротивления УПК. Тиристорные вентили шунтируют либо дешунтируют КБ модулей УПК.

В УУПК-ТК в установившихся режимах работы действующее значение тока в конденсаторной батарее, реакторе и тиристорных вентилях равно действующему значению тока в линии электропередачи. Поэтому



## УГОЛ ЗАЖИГАНИЯ ТИРИСТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНДУКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ЕМКОСТНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ УУПК –27 Ом

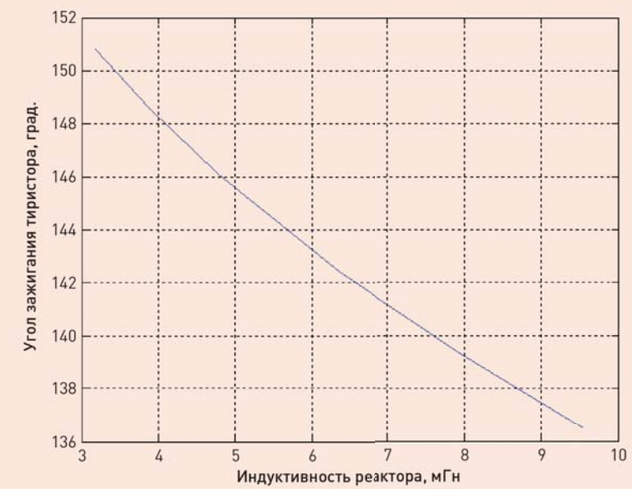



Рис. 6

даже при одинаковых емкостях C и индуктивностях L стоимость силового оборудования УУПК-ТВ выше стоимости того же оборудования в схеме УУПК-ТК.

Основное преимущество УУПК-ТВ по отношению к УУПК-ТК и неуправляемым УПК — возможность предотвращения субсинхронного резонанса и емкостного самовозбуждения [6].

Субсинхронный резонанс может наблюдаться в энергосистемах, где частоты субгармонических (субсинхронных) колебаний в сети близки к собственной частоте крутильных колебаний валов многомассовых электрических машин, таких как турбоагрегаты с массивными роторами генераторов, ступенями паровых турбин, вентиляторами, возбудителями и др. на одном валу [7].

Емкостное, как правило, асинхронное самовозбуждение синхронных генераторов и крупных электрических машин (синхронных и асинхронных двигателей и синхронных и асинхронизированных компенсаторов) может наблюдаться при определенном соотношении емкости УПК и параметров указанных машин, работающих в электрической сети, содержащей емкостные элементы [8].

На рис. 8 показана реальная структурная схема единичного модуля УУПК-ТК или УУПК-ТВ. Здесь использованы такие же обозначения элементов, как на схеме НУПК (см. рис. 1), но имеются дополнительные элементы: тиристорные вентили ВТВ с фазовым управлением или ВТК с ключевым управлением, ограничители перенапряжений ОПН-3, индуктивности Lr.

На рис. 9 показана структура УУПК-ТК или УУПК-ТВ модульного типа [2] из трех модулей.

Приемлемое качество протекания переходного процесса при работе УУПК-ТК достигается при наличии трех и более коммутируемых тиристорными ключами модулей с рекомендуемыми параметрами модуля $X_c$ =10 Ом. Опытный образец такого модуля для УПК на линиях 500 кВ создан и испытан в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» [2].

По сравнению с УУПК-В УУПК-ТК более универсальное и очень быстродействующее компенсирующее устройство, которое может обеспечить не только ведение режима на любом временном интервале, но и демпфирование электромеханических колебаний, а УУПК-ТВ — еще и управление электромагнитными процессами. Но тиристорные устройства более сложные по конструкции и обслуживанию. В отличие от УУПК-В в состав УУПК-ТК входят мощная тиристорная группа с системой охлаждения тиристоров, дополнительные индуктивные реакторы (Lr) для ограничения скорости изменения токов через ТВ, дополнительная батарея ОПН-3 (см. рис. 9). По стоимости УУПК-ТК более чем в 2 раза превосходит УУПК-В.

При одинаковом диапазоне регулирования суммарная мощность емкостных и индуктивных элементов, а также мощность тиристорных блоков УУПК-ТВ значительно больше, чем у УУПК-ТК. Для достижения одинакового технического эффекта необходимая мощность оборудования УУПК-ТК приблизительно в 2–3

## КРАТНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ВЕТВЯХ УУПК-ТВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНДУКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ $X_{CMAX}$ = –27 Ом

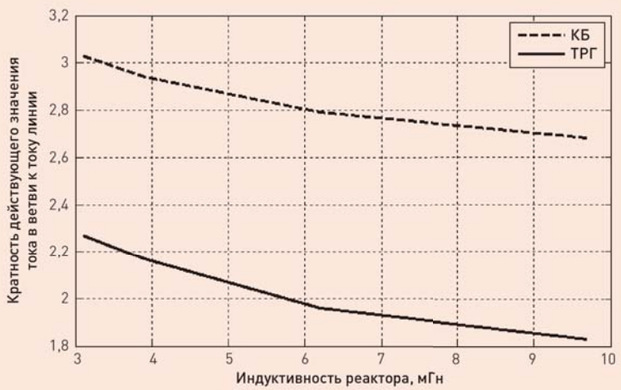



Рис. 7

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МОДУЛЕЙ УУПК-ТК И УУПК-ТВ

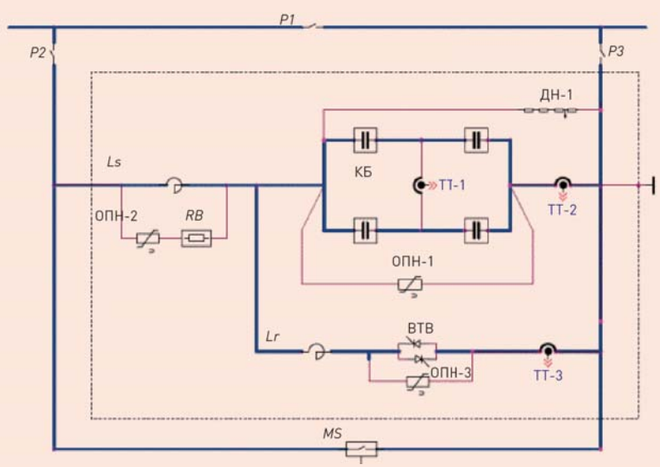



Рис. 8

раза меньше установленной мощности аналогичного оборудования УУПК-ТВ.

При этом удельная стоимость УУПК-ТВ, по зарубежным данным [1, 6], в 3 раза выше аналогичной стоимости УУПК-ТК и в 6 раз — стоимости УУПК-В.

## ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УУПК-ТВ И УУПК-ТК

Если рассматривать математическую однолинейную модель УУПК плавного регулирования (прототипа УУПК-ТВ) [3], то основным регулирующим элементом в этой модели является изменяемое индуктивное сопротивление $X_p$ на некотором полуинтервале $[\infty \div X_{pmin}]$.

На выходе регулятора величина индуктивного сопротивления $X_p = X_L$ может изменяться в указанных выше пределах следующим образом:

$$\Delta X_L = \frac{1}{1+p\tau_{рег}} \sum K_i(p) \cdot \Delta П i, \quad (2)$$

где $K_i(p)$ — передаточные функции регулятора по изменению параметров $\Delta Пi$; $\tau_{рег}$ — эквивалентная постоянная времени контура регулирования, принимаемая в пределах 0,05–0,5 с.

Поскольку ставится задача демпфирования электромеханических колебаний роторов синхронных генераторов, колебаний передаваемой мощности, колебаний частоты, то выбираются те параметры режима, которые отражают эти колебания. Например, для демпфирования колебаний роторов генераторов следует использовать сигналы регулирования по изменению угла генератора $\Delta\delta_г$, скольжения генератора $\Delta s$, частоты $\Delta f$. Для демпфирования колебаний мощности по ВЛ могут быть использованы сигналы по мощности $\Delta P_л$, по углу ВЛ $\Delta\delta_{ВЛ}$, по току линии $\Delta i_л$ и др.



## СОСТАВ И СХЕМА ТИРИСТОРНОГО УПК (УУПК-ТК) ИЗ ТРЕХ МОДУЛЕЙ ПО 10 Ом СТУПЕНЧАТОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ КЛЮЧАМИ (ТК)

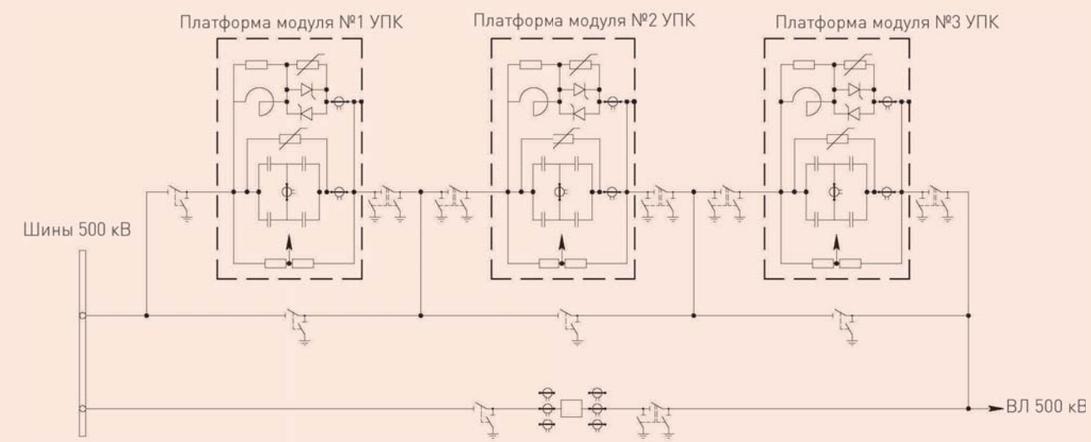



Рис. 9

Предпочтение должно быть отдано регулированию УУПК по местным параметрам: изменению (отклонению) передаваемой по ВЛ активной мощности $\Delta P_л$ (или отклонению тока линии $\Delta i_л$) и частоты сети $\Delta f$.

$$\sum Ki(p) \times \Delta П_i = K_{op} \times \Delta P + K_{0f} \times \Delta f + pK_{1f} \times \Delta f, \quad (3)$$

где $K_{op}$ — коэффициент регулирования по изменению передаваемой активной мощности $\Delta P_л$;

$K_{0f}$ — коэффициент регулирования по изменению частоты сети $\Delta f$;

$K_{1f}$ — коэффициент регулирования по производной частоты сети f.

Упрощенная структурная схема автоматического регулятора УУПК-ТВ приведена на рис. 10.

В блоке $\Delta P_л$ должен отфильтровываться начальный скачок активной мощности, возникающий при ее сбросах после отключения генераторов, нагрузок, КЗ и т.д.

На блок $\Delta f$ подается текущее значение частоты в месте подключения УУПК и уставка $f_0$ — синхронная частота сети предыдущего (исходного) режима, $f_0$ = 50 Гц. В блоках $K_P(p)$ и $K_f(p)$ формируются передаточные функции и устанавливаются конкретные значения коэффициентов усиления $K_{oP}$, $K_{of}$, $K_{1f}$, полученные на основании исследований на моделях и уточненные при натурных испытаниях.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АР УУПК ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ $X_C$

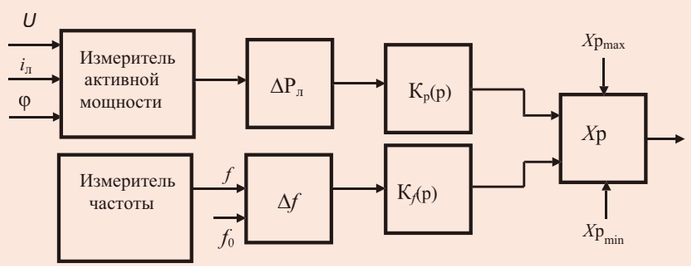



Рис. 10

На выходе АР однолинейной модели УУПК плавного регулирования (УУПК-ПР) отрабатывается величина $X_p(t)$ или изменение этой величины ($\Delta X_p(t)$). На трехфазной модели УУПК-ТВ или реальном устройстве на выходе АР отрабатывается угол открытия тиристорных вентилей α(t).

Рис. 11 и 12 иллюстрируют действие АР УУПК-ПР на однолинейной модели УУПК-ТВ на примере электропередачи 500 кВ Саяно-Шушенской ГЭС — Новокузнецкая, Кузбасская с УУПК [2,3] при двухфазном КЗ на ВЛ 500 кВ СШ — Новокузнецкая и ее отключении через 0,12 с при исходной загрузке станции $P_{СШ\ исх}$ = 2650 МВт. (Здесь Е, эл.град — угол генератора, U; кВ — напряжение в месте КЗ; X — емкостное сопротивление, Ом).

Из приведенных на этих рисунках осциллограмм можно сделать вывод о хорошем демпфировании электромеханических колебаний по производной частоты сети в месте установки УУПК.

Подбором настроечных параметров регулятора можно обеспечить более высокое качество протекания переходного электромеханического процесса.

Для демпфирования низкочастотных колебаний с помощью УУПК-ТК можно использовать предложенный выше регулятор УУПК-ПР (см. рис. 10) с выходом $\Delta X_L$ или Δα на формирователь дискретных сигналов регулирования [4, 5] с заданными зонами нечувствительности (ЗН) и далее через распределитель выдачи сигналов на модули УУПК-ТК [13].

Для реального устройства УУПК-ТК был разработан новый алгоритм управления, структура которого приведена на рис. 13.

## ДВУХФАЗНОЕ КЗ НА ЗЕМЛЮ ВБЛИЗИ ПС 500 КВ — НОВОКУЗНЕЦКАЯ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ ВЛ 500 кВ СШ ГЭС — НОВОКУЗНЕЦКАЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ УУПК

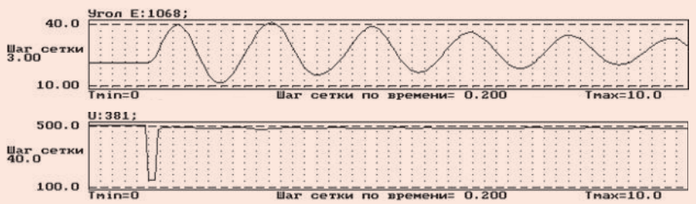



Рис. 11

## ДВУХФАЗНОЕ КЗ НА ЗЕМЛЮ ВБЛИЗИ ПС 500 КВ — НОВОКУЗНЕЦКАЯ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ ВЛ 500 кВ СШ ГЭС — НОВОКУЗНЕЦКАЯ ПРИ НАЛИЧИИ УПК $X_C$ 50% (УУПК 20% + НУПК 30%) АР УУПК ПО dF / dT ($K_{1F}$ = −3, $\tau_P$ = 0,05С)

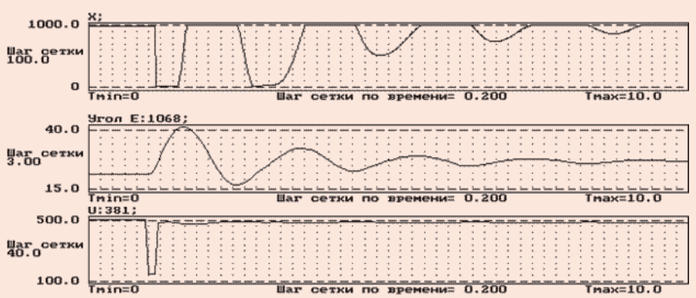



Рис. 12

Здесь: звено 1 — фильтр нижних частот 2-го порядка с частотой среза $\omega_1$ и коэффициентом демпфирования $\delta_1$. На вход звена 1 поступает сигнал суммарной мгновенной активной мощности, передаваемой через все три фазы УПК. Звено 2 — элемент нелинейной функции:



## СТРУКТУРА РЕГУЛЯТОРА TSSC (УУПК-ТК)

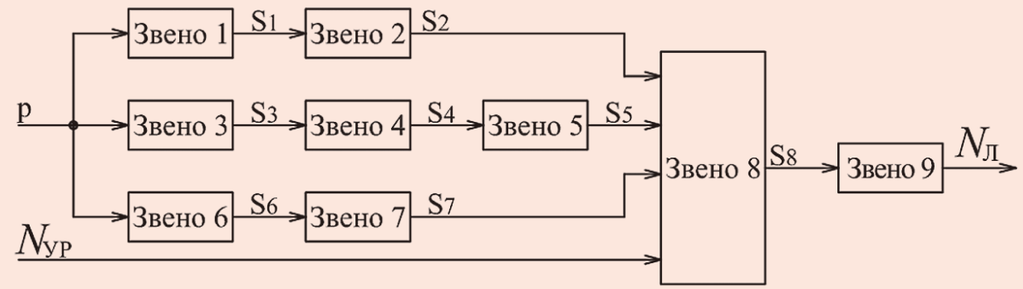



Рис. 13

$$S2 = \begin{cases} +1, \text{при } S1 \le -P1, \\ +2, \text{при} -P1 \le S1 < -P2, \\ +3, \text{при} -P2 \le S1 < -P3, \\ \ \ 0, \text{при} -P3 \le S1 < +P3, \\ -3, \text{при} +P3 \le S1 < +P2, \\ -2, \text{при} +P2 \le S1 < +P1, \\ -1, \text{при } P1 \le S1, \end{cases}$$

где S1 — вход блока; S2 — выход блока; P1, P2, P3 — параметры (активные мощности в фазах линии). Звено 3 — узкополосный фильтр 2-го порядка с частотой настройки $\omega_2$ и коэффициентом демпфирования $\delta_2$. Звено 4 задано уравнением:

$$S4 = k_1 |S3|,$$

где S3 — вход блока; S4 — выход блока; $k_1$ — параметр. Звено 5 — фильтр нижних частот 2-го порядка с частотой среза $\omega_3$ и коэффициентом демпфирования $\delta_3$. Звено 6 — фильтр нижних частот 2-го порядка с частотой среза $\omega_4$ и коэффициентом демпфирования $\delta_4$. Звено 7 — релейный элемент с функцией переключения, представленной на рис. 14, где S6 — вход блока, S7 — выход блока, $k_2$ — параметр.

Звено 8 задано уравнением:

$$S8 = f(S2 \cdot S5 \cdot S7 + N_{УР}),$$

где f — функция взятия целого числа; S2, S5, S7; $N_{УР}$ — входы блока; S8 — выход. Звено 9 задано уравнением:

$$N_л = \begin{cases} 0, \text{при } S8 \le 0, \\ S8, \text{при } 0 < S8 \le N_{max} \\ N_{max}, \text{ при } S8 > N_{max}, \end{cases}$$

где $N_л$ — уставка количества включенных модулей в фазе УПК. Модуль считается включенным, если линейный ток протекает через КБ. $N_{max}$ — количество модулей в фазе УПК.

Иллюстрация работы УУПК-ТК выполнена на примере двухцепной ВЛ с УПК в верхней цепи, показанной на рис. 15.

В качестве возмущения рассматривается отключение нижней ветви.

В случае нерегулируемого УПК ($X_c$=2 Ом) отключение линии приводит к нарушению устойчивости: нарастающие по модулю колебания мощности по линии показаны зеленым цветом на рисунке 16, а.

При наличии УУПК-ТК небольшой мощности из четырех коммутируемых тиристорными ключами модулей ($X_c$=4x1 Ом), как это видно из рис. 16 (красный цвет), режим сохраняется устойчивым. Измене-

## ГИСТЕРЕЗИС РЕЛЕЙНОГО БЛОКА (ЗВЕНА 7)

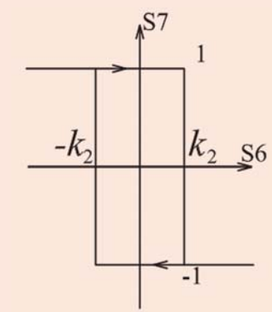



Рис. 14

ние емкостного сопротивления УУПК показано на рисунке 16, б.

Сравнение действия УУПК-ТК и УУПК-ТВ сделано для такой же структурной схемы, но с параметрами электрической связи 500 кВ СШ ГЭС — Новокузнецкая, Кузбасская, на трехфазной модели в ПК Matlab Simuling.

Ветви 1–3, 4–5, 2–5 моделируются пи-схемой замещения со следую-

щими погонными параметрами: r = 0,029 Ом/км; $x_1$ = 0,308 Ом/км; $b_1$ = 3,604 мкСм/км.

Длины ВЛ 500 кВ моделируемых ветвей 1–3, 4–5 и 2–5 составляли 150, 300 и 450 км соответственно. Ветви 0–1, 0–2, 1–2 и 5–6 моделировались индуктивными сопротивлениями 30, 30, 10 и 20 Ом соответственно. Параметры генераторов и нагрузок приведены к напряжению 500 кВ. Мощность эквивалентного генератора составляла 9000 МВт, мощность, потребляемая нагрузкой, — 7600 МВт. Величина емкостного сопротивления УПК в ветви 2–5 могла изменяться в диапазоне от 10 до 20 Ом. В качестве возмущения принято резкое уменьшение нагрузки в узле 5 на 450 МВт.

Результаты расчетов приведены на рис. 17 для активных мощностей на участке схемы 1–3 и на рис. 18 для изменения эквивалентного емкостного сопротивления УУПК-ТВ $X_{TCSC}$ и УУПК-ТК $X_{TCSC}$.

Здесь $P_1$ — активная мощность, передаваемая по ВЛ при неуправляемой УПК (зеленый цвет); $P_2$ — активная мощность, передаваемая по линии при УПК типа УУПК-ТВ (TCSC) (красный цвет) и $P_3$ — активная мощность, передаваемая при УПК типа УУПК-ТК (TSSC) (синий цвет).

Приведенные выше осциллограммы переходных процессов в тестовой схеме показывают, что при больших возмущениях в сети УУПК-ТВ и УУПК-ТК приблизительно одинаково влияют на демпфирование электромеханических колебаний и на динамическую устойчивость.

## ТЕСТОВАЯ СХЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ УУПК-ТК И УПК-ТВ

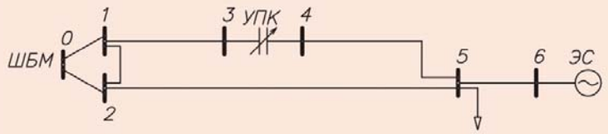
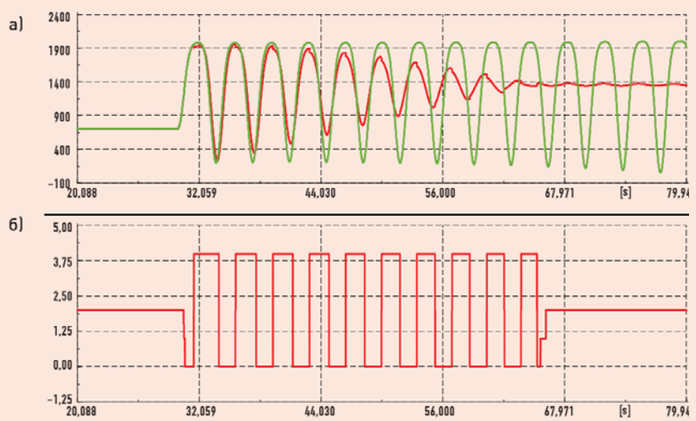



Рис. 15

## РАБОТА 4-Х СТУПЕНЧАТОГО УУПК-ТК ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НИЖНЕЙ ЦЕПИ ДВУХ ЦЕПНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ




а) изменение активной мощности по линии; б) изменение емкостного сопротивления УПК при действии АР УУПК-ТК.

Рис. 16

## ВЫВОДЫ

Из зарубежного опыта эксплуатации УПК следует, что наибольшее применение находят неуправляемые устройства (НУПК) и управляемые с переключением вакуумными или элегазовыми выключателями (УУПК-В) в сетях напряжением 500 кВ и выше, в которых осуществляется заранее ожидаемое изменение режима и требуется заранее выбранная коррекция параметров ветвей с целью повышения пропускной способности электрической системы и оптимального перераспределения потоков мощностей в сети.

Электромеханическое устройство УУПК-В может участвовать в формировании установившегося режима работы сети на суточном и более длительном интервале времени. В составе автоматического регулятора УУПК-В, помимо основных функциональных блоков, должны быть блоки формирования очередности включения ступеней и счетчики числа коммутаций каждого выключателя.



В отличие от УУПК-В УУПК-ТК являются быстродействующими устройствами. Они могут демпфировать электромеханические колебания между энергосистемами и колебания роторов генераторов электрических станций, работающих на протяженные электропередачи вдали от узлов потребления. Предложено две структуры построения ступенчатого регулятора для УУПК-ТК и законы регулирования по местным параметрам (частоте сети, току линии, передаваемой активной мощности).

Тиристорные устройства плавного регулирования УУПК-ТВ являются универсальными наиболее быстродействующими устройствами, выполняющими весь спектр регулирования. Будучи самыми дорогостоящими, они позволяют предотвратить и подавить емкостное самовозбуждение электрических машин, предупредить развитие субсинхронных колебаний и торсиальный резонанс. При выборе этих устройств требуется специальное техническое и технико-экономическое рассмотрение и обоснование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Performance Evaluation and Applications Review of Existing Thyristor Control Series Capacitor Devices — TCSC. WG B4.49. CIGRE Publication. October 2013.
2. А.В. Антонов, В.К. Фокин, Е.В. Тузлукова. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. 2016–2017. № 6 (29). С. 26–41.
3. В.К. Фокин. Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС — Новокузнецкая, Кузбасская // Энергия единой сети. 2013. № 2 (7). С. 66–73.
4. В.К. Фокин, А.В. Фокин, Л.К. Филатова. Моделирование регулирующих устройств плавного и ступенчатого регулирования в расчетах режимов и переходных процессов на ПЭВМ // Вестник ВНИИЭ-96. М.: ЭНАС, 1996. С. 90–93.
5. V.I. Kochkin, V.V. Mishta, V.I. Filatov, A.P. Obyazuev, V.K. Fokin, V.A. Stroev, V.I. Chekhov. The Use of Discrete Controlled Thyristor Compensators at 500–1150 kV Overhead Transmission Lines. 9th Internation Power System Conference. Proceeding. Vol. 2. P. 482–493. (PSC-94. 4–7 July 1994, St. Peterburg).
6. G. Laszlo. Understanding FACTS. IEEE Press, 2000.
7. P. Kundur Power System Stability and Control. McGraw Hill,1994.
8. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. (РД 34.20.578-79). М.: Союзтехэнерго, 1979.
9. R. Sadikovic, G. Andersson, P. Korba. Application of FACTS Devices for Damping of Power System Osscilations. IEEE PowerTech 2005. Russia, June 2005.
10. A. Lennart. Damping Algorithm based on Phasor Estimation // Power Engineering Society Winter Meeting. 2001. IEEE. Vol. 3. P. 1160–1165.
11. А.А. Мартиросян. Повышение устойчивости электроэнергетических систем регулируемой продольной компенсации. Дисс. канд. техн. наук: 05.14.02. Иваново 2009.
12. Y. Chompoobutrgool, L. Vanfetti, M. Ghandhari. Survey on Power System Stabilizer Control and their Prospective Applications for Power System Damping using Synchrophasor-Based Wide-Area Systems // European Transactions on Electrical Power. 2011. Vol. 21. No. 8. P. 2098–2111.
13. В.И. Кочкин, В.К. Фокин, А.П. Обязуев, О.П. Нечаев, В.И. Филатов, В.В. Миша, В.Г. Киракосов, В.А. Строев. Компенсаторы реактивной мощности ступенчатого регулирования для стабилизации напряжения и повышения пропускной способности линий электропередачи напряжением 110–1150 кВ // Вестник ВНИИЭ-96. М.: ЭНАС, 1996. С. 20–23.

## ОСЦИЛЛОГРАММЫ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО ЛЭП МОЩНОСТИ

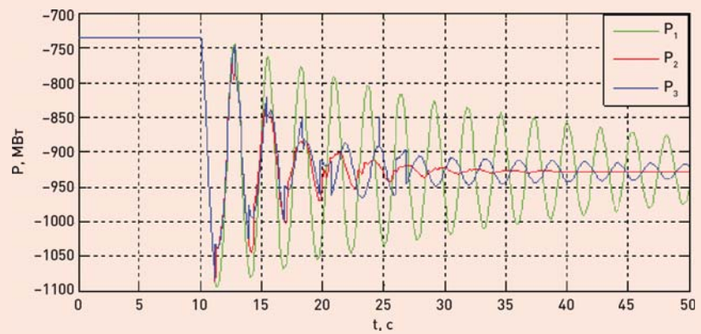



Рис. 17

## ОСЦИЛЛОГРАММЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ УПК

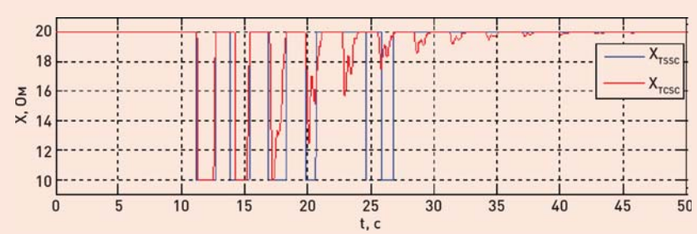



Рис. 18