

\* \* \*

## Разработка моделей энергосистем с учетом гибких электропередач

ЛИХАЧЕВ А.П.

*Представлен принцип работы наиболее сложных сетевых устройств FACTS: СТАТКОМ параллельного и последовательного включения, объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ). Приведены уравнения однолинейных математических цифровых моделей данных устройств и на их основе смоделированы динамические модели в программно-вычислительном комплексе «Eurostag» с учетом технических ограничений для расчетов установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. Примерно при равных условиях было проведено сопоставление различных устройств FACTS в части влияния на статическую и динамическую устойчивость электроэнергетической системы, демпфирование электромеханических колебаний, а также перераспределения потоков мощности.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, устройства FACTS, моделирование

Развитие электроэнергетики сопровождается внедрением инновационных технологий [1], одной из которых является технология гибкой системы передачи переменного тока (Flexible AC Transmission System – FACTS). Хорошо управляемые быстродействующие сетевые устройства FACTS последовательного, параллельного и «комбинированного» включения при достаточно широком применении существенно изменяют свойства

*The operating principles of the most sophisticated devices for flexible AC transmission systems (FACTS) are presented, including parallel- and series-connected static reactive power compensators on the basis of a voltage converter (STATCOMs) and united power flow controllers (UPFCs). Equations of the single-line digital mathematical models of these devices are derived, and dynamic models are constructed on their basis in the Eurostag software computation system taking technical constraints into account for calculating steady-state modes and electromechanical transients. A comparison of different FACTS devices is carried out under the maximally equal conditions with regard to their effect on the steady-state and transient stability of the electric power system, damping of electromechanical oscillations, and redistribution of power flows.*

**Key words:** electric power system, FACTS, modeling

электрической сети, обеспечивая высокую управляемость ее режима и превращая ее в перспективе в активно-адаптивную сеть (ААС) в составе «интеллектуальной» электроэнергетической системы (ЭЭС).

Согласно определению, предложенному в 1992 г. Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) в США [2] устройством FACTS называется система, включающая статические регулято-

ры, основанные на применении силовой электроники (статические тиристорные компенсаторы (СТК), шунтирующие реакторы, управляемые тиристорами (УШРТ), управляемые устройства продольной компенсации (УУПК), статические компенсаторы на основе преобразователей напряжения (СТАТКОМ)) и другие статические регуляторы [3] (фазорегулирующие трансформаторы (ФРТ), управляемые шунтирующие реакторы с подмагничиванием постоянным током (УШРП)), предназначенные для повышения пропускной способности сети, а также управления потоками активной и реактивной мощности в ЭЭС.

Для решения актуальных проблем функционирования Единой энергетической системы (ЕЭС) России и транспорта электроэнергии приказом РАО «ЕЭС России» № 380 от 19.03.2003 утверждена программа «Создание в Единой энергосистеме России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока и устройств регулирования напряжения». В результате реализации программы в ЕЭС/ЕНЭС установлен целый ряд устройств FACTS: СТАТКОМ 50 Мвар на ПС 400 кВ Выборгская, СТК 150 Мвар на ПС 500 кВ Заря и др. Программа развития ЕЭС России на 2011–2017 г. [1] также предполагает внедрение поперечных и продольных сетевых устройств FACTS.

Реальной установке любого устройства должен предшествовать период научно-исследовательских работ, направленных на его технико-экономическое обоснование с использованием специализированных цифровых моделей устройств FACTS с разной степенью детализации их представления.

Используются как трехфазные (с «повентильным» представлением), так и однолинейные цифровые динамические модели. При исследованиях установившихся режимов и электромеханических переходных процессов в ЭЭС устройства FACTS могут быть смоделированы внешними характеристиками в однолинейном динамическом исполнении. По результатам исследований с использованием таких моделей определяется место установки устройства FACTS, выбирается его тип, мощность и диапазоны регулирования, определяется алгоритм управления режимом ЭЭС.

В статье рассмотрены однолинейные математические цифровые и динамические модели наиболее современных в настоящее время сетевых устройств FACTS, а также результаты их апробации на схеме ЭЭС простой структуры.

**Математические модели устройств FACTS. Модель с управляемой параллельной компенсацией (СТАТКОМ).** Рассматривается СТАТКОМ с поперечным включением в схему сети (рис. 1). Данное

устройство способно создавать на выходе ПН трехфазную ЭДС  $E$  заданной амплитуды и частоты синхронно с напряжением в узле подключения. За счет изменения амплитуды ЭДС по отношению к амплитуде напряжения сети реализуется обмен реактивной мощностью между СТАТКОМ и сетью. В соответствии с возможностями устройства его схема замещения аналогична включенному параллельно в ЭЭС СК. Значение  $x_{\text{ТР}}$  соответствует сопротивлению трансформатора, при этом потерями активной и реактивной мощности в полностью управляемых тиристорах пренебрегается, так как  $x_{\text{ТР}} \gg x_{\text{ПН}}$ .

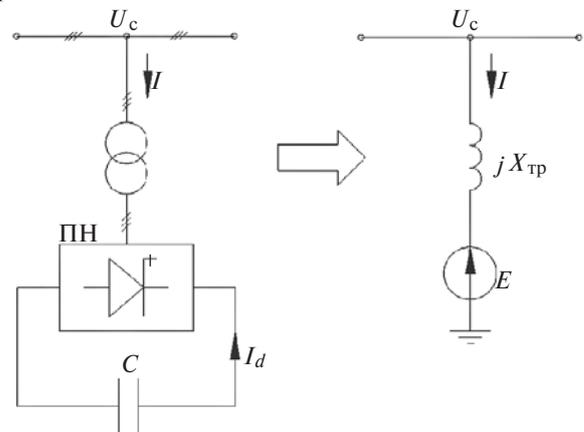


Рис. 1. Принципиальная схема подключения СТАТКОМ параллельно в сеть и его схема замещения

Схема замещения (согласно [4, 5]) описывается уравнением

$$\dot{I} = (-j) \frac{\dot{U}_c - \dot{E}}{x_{\text{ТР}}}. \quad (1)$$

На рис. 2 представлены векторные диаграммы для СТАТКОМ в различных режимах работы.

**Модели с управляемой последовательной компенсацией (УУПК, СТАТКОМ).** Мировые разработки насчитывают две схемы (как минимум) создания УУПК с плавным регулированием.

1. *Thyristor-controlled series capacitor – TCSC.* Управление конденсатора достигается за счет шун-

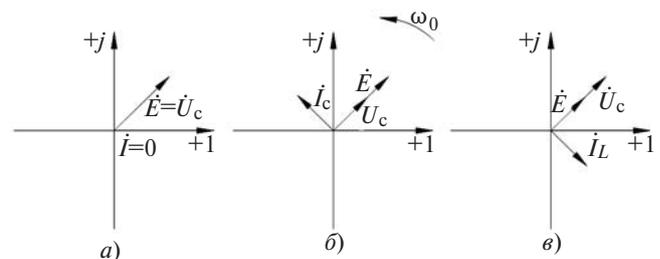


Рис. 2. Векторные диаграммы работы устройства СТАТКОМ: а — в режиме холостого хода; б — генерации реактивной мощности; в — потребления реактивной мощности

тирующего его УШРТ. Имеется дополнительная возможность перехода в индуктивный режим («антикомпенсации»), минуя физическое явление резонанса в LC-контуре.

2. *Gate turn-off thyristor-controlled series capacitor – GCSC.* Управление конденсатора проводится за счет полностью управляемых тиристоров (транзисторов).

Далее рассматривается вторая схема как наиболее перспективная и простая в управлении. Эффективное сопротивление линии с УУПК

$$x_{\phi} = x_{л} - x_{с} = (1 - k)x_{л}, \quad (2)$$

где  $k$  – степень компенсации реактивного сопротивления линии:  $0 \leq k \leq k_{ном}$ .

Принципиальная схема включения устройства СТАТКОМ последовательно в начало электропередачи представлена на рис. 3. Концепция устройства СТАТКОМ последовательного включения заключается в следующем: ПН, работая в режимах генерации или потребления реактивной мощности, с помощью последовательной обмотки трансформатора вводит в линию вектор регулируемой ЭДС  $E$ , максимальным значением которой является номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора  $E_{max} = U_{ВНном}$ . В данном случае вектор  $E$  может быть ортогональным по отношению к вектору тока в линии ( $\pm 90^\circ$ ), что эквивалентно последовательной компенсации (включению последовательно в линию емкости) или антикомпенсации (включению индуктивности).

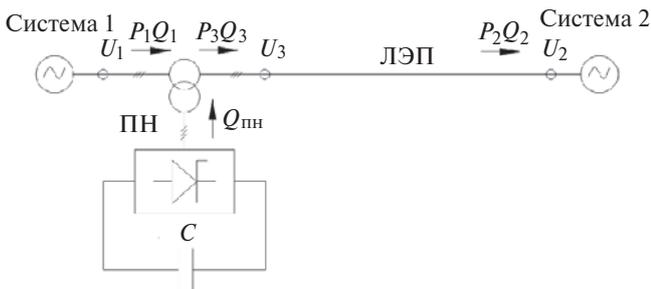


Рис. 3. Схема рассматриваемой электропередачи с устройством СТАТКОМ последовательного включения

Основным критерием для выбора номинальных мощностей устройств УУПК и СТАТКОМ последовательного включения является способность пропускать полный ток линии:

$$S_{тр.ном} = S_{ПНном} = 3E_{max} I_{л max}; \quad (3)$$

$$S_{УПКном} = 3DU_{Сном} I_{л max} = 3I_{л max}^2 X_{Сном}. \quad (4)$$

Если

$$E_{max} = DU_{Сном} = I_{л max} X_{Сном} = I_{л max} k_{ном} X_{л}, \quad (5)$$

то мощности устройств тождественно равны.

Следует учесть тот фактор, что вводимая устройством СТАТКОМ последовательного включения ЭДС  $E$  не зависит от модуля тока в линии, тогда на основании (5) при  $I_{л max}$  будем иметь  $k \approx k_{ном}(\min)$ , а при  $I_{л min}$  –  $k \approx \max$ . Данную возможность следует учитывать при выборе алгоритма управления этим устройством, так как при  $k \approx 0,3$  возможно превышение наибольшего рабочего напряжения на зажимах устройства.

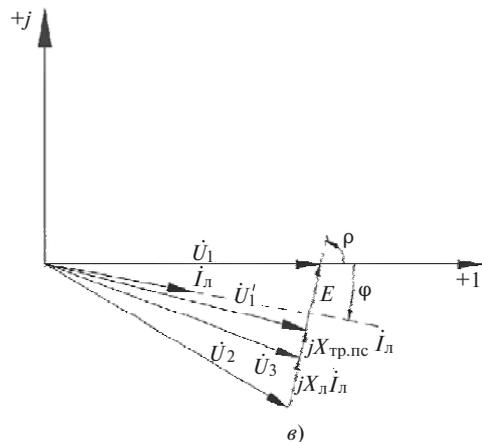
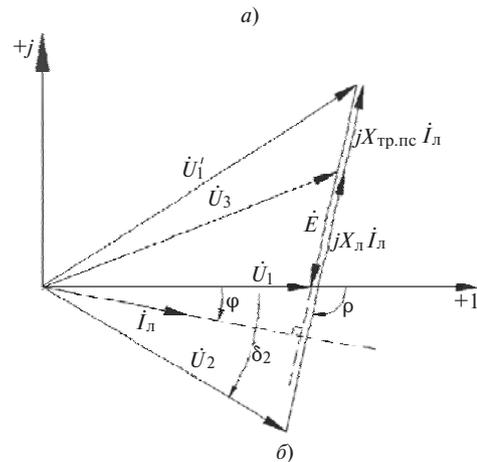
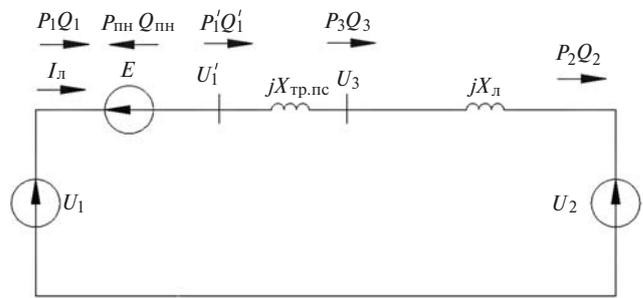


Рис. 4. Схема замещения (a) и векторная диаграмма рассматриваемой электропередачи в емкостном режиме (б) и индуктивном (в)

На рис. 4 представлена схема замещения и векторные диаграммы рассматриваемой электропередачи.

В емкостном режиме (рис. 4,б) вектор  $E$  отстает от вектора тока линии  $I_{л}$  и имеет фазу  $r < 0$ ; в индуктивном (рис. 4,в) вектор  $E$  опережает вектор  $I_{л}$  и имеет фазу  $r > 0$ .

Математическая модель электропередачи с устройством СТАТКОМ последовательного включения имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{л} &= \frac{\dot{U}_1 - \dot{E}\sqrt{3} - \dot{U}_2}{j(X_{л} + X_{тр.пс})}; \quad P_1 = P_1\phi = P_3 = P_2; \\ P_1 &= \text{Re}(\dot{U}_1 \hat{I}_{л}) = \frac{U_1 U_2}{(X_{л} + X_{тр.пс})} \sin d_{12} + \\ &+ \frac{U_1 E \sqrt{3}}{(X_{л} + X_{тр.пс})} \sin(d_1 - r); \\ Q\phi &= Q_1 - Q_{пн}; \\ Q_1 &= \text{Im}(\dot{U}_1 \hat{I}_{л}) = \frac{U_1^2}{X_S} - \frac{U_1 U_2}{X_S} \cos d_{12} - \\ &- \frac{U_1 \sqrt{3} E}{X_S} \cos(d_1 - r); \\ Q_{пн} &= \text{Im}(\sqrt{3} E \hat{I}_{л}) = -\frac{3E^2}{X_S} + \frac{U_1 \sqrt{3} E_{пс}}{X_S} \cos(d_1 - r) - \\ &- \frac{U_2 \sqrt{3} E}{X_S} \cos(d_2 - r); \\ Q_2 &= \text{Im}(\dot{U}_2 \hat{I}_{л}) = Q\phi X_S \dot{I}_{л} \hat{I}_{л} - j \frac{U_1^2}{X_S}. \end{aligned}$$

При  $E = 0$  уравнения превращаются в традиционные для определения передаваемой по линии активной и реактивной мощности.

При наличии в рассматриваемой электропередаче УУПК вместо устройства СТАТКОМ последовательного включения математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{л} &= \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{j(X_{л} - X_C)}; \\ P_{л} &= \text{Re}(\dot{U}_1 \hat{I}_{л}) = \frac{U_1 U_2}{(X_{л} + X_C)} \sin d_{12}; \\ 0 < X_C < k_{ном} X_{л}; \quad Q\phi &= Q_1 - Q_{уупк}; \\ Q_1 &= \text{Im}(\dot{U}_1 \hat{I}_{л}); \\ Q_{уупк} &= \text{Im}(D \dot{U}_C \hat{I}_{л}) = \text{Im}(-j X_C \dot{I}_{л} \hat{I}_{л}); \\ Q_2 &= \text{Im}(\dot{U}_2 \hat{I}_{л}) = Q\phi - j X_{л} \dot{I}_{л} \hat{I}_{л}. \end{aligned}$$

**Модели с управляемой комбинированной компенсацией (ОРПМ, ФПУ).** На рис. 5 представлена ЛЭП с включенным устройством ОРПМ на одном из ее концов.

Устройство ОРПМ по существу построено на вставке постоянного тока, состоящей из двух преобразователей ПН1 и ПН2, соединенных на стороне постоянного тока параллельно. Основную функцию ОРПМ ПН2 выполняет введением в линию через последовательный трансформатор ЭДС  $E$ , значение которой может изменяться как по амплитуде, так и по фазе независимо от вектора тока линии (в отличие от устройства СТАТКОМ последовательного включения). В общем случае

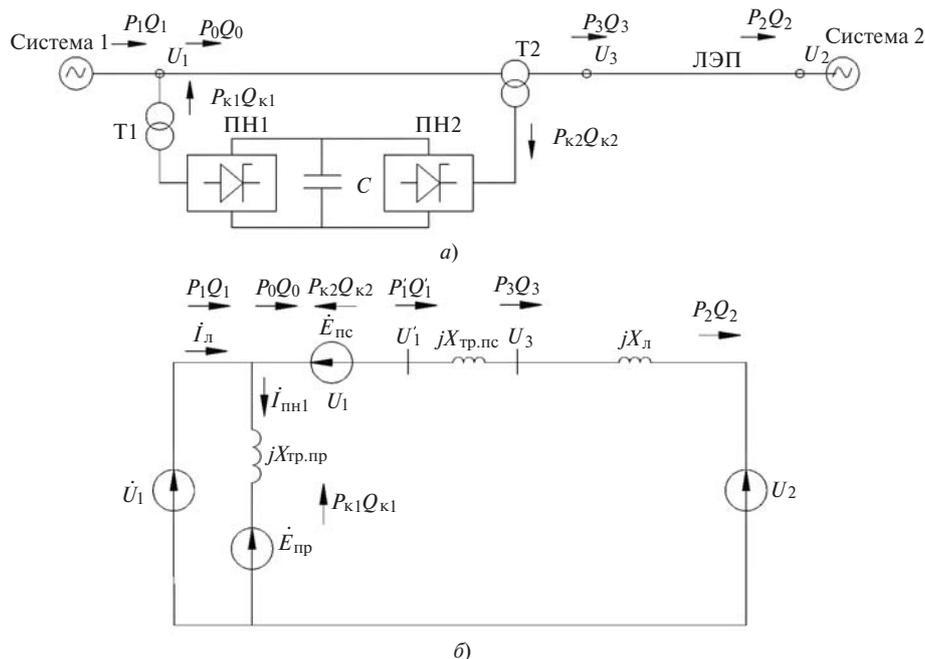


Рис. 5. Схема рассматриваемой электропередачи с устройством ОРПМ (а) и ее схема замещения (б)

фаза вводимой ЭДС  $E$  по отношению к току линии отличается от  $90^\circ$ , что означает наличие обмена активной мощностью между линией и ПН2. Данная мощность будет отбираться (или выдаваться) с шин системы  $I$  через ПН1 и вставку постоянного тока. Таким образом, первой функцией ПН1 является транзит (создание контура обмена мощностью ПН1–ПН2) активной мощности к ПН2 по связи постоянного тока. Ко второй функции ПН1 относится обеспечение независимой поперечной компенсации линии за счет генерации или потребления реактивной мощности для стабилизации напряжения на шинах системы  $I$ .

Векторная диаграмма работы отдельной последовательной части устройства представлена на рис. 6.

Максимальное значение ЭДС  $E$  (окружность на рис. 6) соответствует номинальному напряжению обмотки ВН последовательного трансформатора. Штриховой линией показаны границы наибольшего рабочего напряжения из условия нормальной работы электрооборудования.

Рассматриваемое устройство ОРПМ имеет три характерных режима работы последовательной части:

1. *Режим регулируемой продольной компенсации.*

Этот режим соответствует отдельной самостоятельной работе параллельного и последовательного СТАТКОМ, т.е. без связи на постоянном токе. Векторная диаграмма данного режима полностью совпадает с векторной диаграммой СТАТКОМ последовательного включения (см. рис. 4,б,в). Режим имеет недостаток в части возможного ограничения вектора  $E$  из-за превышения напряжения в точке  $U_\phi$  наибольшего рабочего напряжения.

2. *Режим регулируемого фазоворотного устройства.* В данном режиме вектор напряжения сдвинут по модулю, при этом угол вектора  $E$  соответствует диапазону  $-90^\circ < r < 90^\circ$ . Векторная диа-

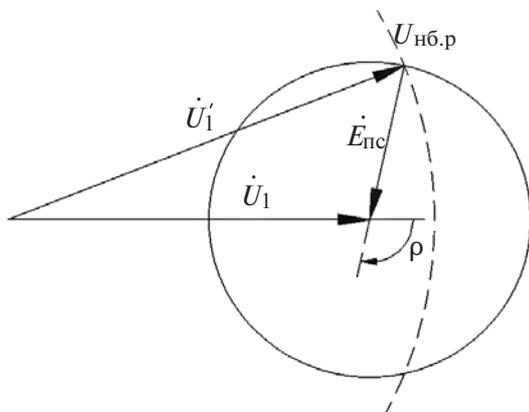


Рис. 6. Векторная диаграмма последовательной части ОРПМ

грамма данного режима представлена на рис. 7,а. Здесь угол между вектором ЭДС  $E$  и током линии  $I_L$   $q^1 90^\circ$ , что подразумевает переток активной мощности по контуру ПН1–ПН2.

3. *Режим «свободного» регулирования* (рис. 7,б). При установке устройства ОРПМ с рассматриваемым режимом регулирования на одной из параллельно работающих ЛЭП возможно поддержание перетока не только активной, но и реактивной мощности по данной линии. Это объясняется тем, что если задать в качестве уставок регулятора переток активной мощности по линии и напряжение на выходном зажиме устройства ОРПМ, то вектор  $E$  свободно определит свое положение.

При разработке математической модели принято допущение, что преобразователь ПН1, входящий в состав ОРПМ и включенный на шины узла  $I$ , работает только в режиме передачи активной мощности.

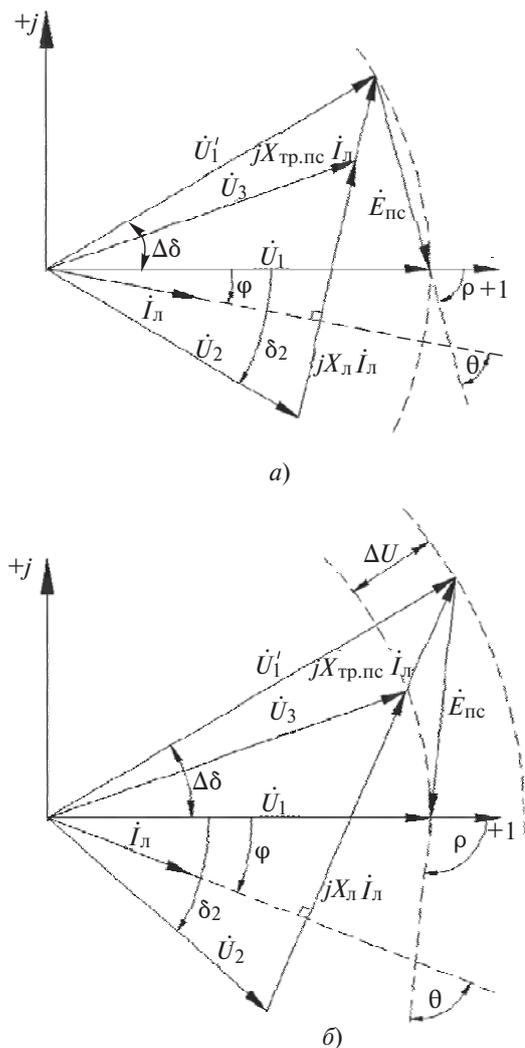


Рис. 7. Векторная диаграмма рассматриваемой электропередачи с различными режимами работы ОРПМ: а — фазоворотного устройства; б — «свободного» регулирования

Математическое описание работы ОРПМ для исследуемой электропередачи имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{\text{л}} &= \frac{\dot{U}_1 - \sqrt{3}E - \dot{U}_2}{jX_{\text{S}}}, \text{ где } X_{\text{S}} = X_{\text{л}} + X_{\text{тр.пос}}; \\
 P_1 &= P_1 \neq P_3 = P_2; \quad P_1 = P_0 - P_{\text{к1}}; \quad P_1 \neq P_0 - P_{\text{к2}}; \\
 P_{\text{к1}} &= P_{\text{к2}} = P_{\text{к}}; \\
 P_0 &= \text{Re}(\dot{U}_1 \hat{I}_{\text{л}}) = \frac{U_1 U_2}{X_{\text{S}}} \sin d_{12} + \frac{U_1 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \sin(d_1 - \gamma); \\
 P_{\text{к}} &= \text{Re}(\sqrt{3}E_{\text{пс}} \hat{I}_{\text{л}}) = \frac{\sqrt{3}E_{\text{пс}} U_1}{X_{\text{S}}} \sin(d_1 - \gamma) - \\
 &- \frac{\sqrt{3}E_{\text{пс}} U_2}{X_{\text{S}}} \sin(d_2 - \gamma); \\
 P_1 &= P_1 \neq \frac{U_1 U_2}{X_{\text{S}}} \sin d_{12} + \frac{\sqrt{3}E_{\text{пс}} U_2}{X_{\text{S}}} \sin(d_2 - \gamma); \\
 P_2 &= \text{Re}(\dot{U}_2 \hat{I}_{\text{л}}) = \frac{U_1 U_2}{X_{\text{S}}} \sin d_{12} + \frac{\sqrt{3}E_{\text{пс}} U_2}{X_{\text{S}}} \sin(d_2 - \gamma); \\
 Q_{\text{к1}} &= 0; \\
 Q_0 &= Q_1 = \text{Im}(\dot{U}_1 \hat{I}_{\text{л}}) = -\frac{U_1^2}{X_{\text{S}}} - \frac{U_1 U_2}{X_{\text{S}}} \cos d_{12} - \\
 &- \frac{U_1 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_1 - \gamma); \\
 Q_{\text{к2}} &= Q_{\text{к}} = \text{Im}(\sqrt{3}E_{\text{пс}} \hat{I}_{\text{л}}) = -\frac{3E_{\text{пс}}^2}{X_{\text{S}}} + \\
 &+ \frac{U_1 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_1 - \gamma) - \frac{U_2 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_2 - \gamma); \\
 Q_{\text{ф}} &= Q_0 - Q_{\text{к}} = \frac{U_1^2 + 3E_{\text{пс}}^2}{X_{\text{S}}} - \frac{2U_1 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_1 - \gamma) + \\
 &+ \frac{U_2 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_2 - \gamma); \\
 Q_2 &= \text{Im}(\dot{U}_2 \hat{I}_{\text{л}}) = Q_{\text{ф}} - jX_{\text{S}} \dot{I}_{\text{л}} \hat{I}_{\text{л}} = -\frac{U_2^2}{X_{\text{S}}} + \\
 &+ \frac{U_1 U_2}{X_{\text{S}}} \cos d_{12} - \frac{U_2 \sqrt{3}E_{\text{пс}}}{X_{\text{S}}} \cos(d_2 - \gamma).
 \end{aligned}$$

**Апробация динамических моделей устройств FACTS. Динамические модели FACTS и расчетная модель ЭЭС.** На основании уравнений математических моделей устройств FACTS были реализованы их динамические модели в ПВК «Eurostag» [6] при использовании метода, основанного на применении «источников тока». «Источники тока» представляют собой элементы, посредством которых может генерироваться или потребляться активная и реактивная мощность в узле примыкания. Реализует алгоритм работы и систему регулирования

FACTS обязательная составляющая «источника тока» — «макроблок», уравнения которого можно практически произвольно формировать с использованием встроеного макроязыка. Состав последнего включает стандартные алгебраические и тригонометрические операторы, типовые звенья автоматического регулирования, ограничителя, реле и т.д.

В качестве режимного параметра регулирования для регуляторов устройства СТАТКОМ последовательного включения и УУПК принята активная мощность по линии, в которой данное устройство установлено, с воздействием на модуль располагаемой ЭДС  $E$  или емкостное сопротивление соответственно. Для последовательной части устройства ОРПМ используется двухпараметрическое регулирование по отклонению как активной, так и реактивной мощности по линии с воздействием на значения  $Dd$  и  $DU$  (см. рис. 7,б), исходя из ресурса ЭДС  $E$ , при этом система регулирования настроена таким образом, что приоритет отдается значению  $Dd$ . Частным случаем регулятора ОРПМ является устройство ФПУ, которое реализуется при  $DU = 0$ .

Устройство СТАТКОМ параллельного включения реагирует на отклонение модуля напряжения в узле подключения с воздействием на располагаемый ток ПН, генерируя или потребляя реактивную мощность. Кроме того, регулятор ПН1 параллельной части ОРПМ отвечает также за отбор или выдачу активной мощности в контур ПН1—ПН2. Данная функция последнего является приоритетной, при этом оставшийся ресурс тока ПН1 также расходуется на поддержание модуля напряжения в начале устройства ОРПМ.

Система регулирования всех устройств соответствует пропорционально-интегральному закону регулирования [7]. В ее состав также включены все необходимые защиты: от превышения номинального тока ПН, от недопустимо низкого снижения напряжения ( $0,2U_{\text{НОМ}}$ ) в узлах подключения ПН, от повышения напряжения на выходном зажиме устройств СТАТКОМ последовательного включения и УУПК. Защиты действуют на ограничение вектора ЭДС  $E$  (сопротивления  $X_{\text{С}}$ ) или его обращение в нуль.

Расчетная схема ЭЭС приведена на рис. 8.

Характеристики ЭЭС: электростанция — 4' ТВВ-800-2; повышающая подстанция — 4' ТЦ-1000000/500; линии электропередачи 500 кВ, протяженностью 300 км (сечение 3' АС 400/51):  $L_1$  три цепи;  $L_2$  две цепи; промежуточная подстанция —  $P_{\text{Н}}=1000$  МВт,  $Q_{\text{Н}}=600$  Мвар, статическая характеристика нагрузки:  $S_{\text{Н}} = S_0 (U / U_{\text{НОМ}})^{\gamma} (f / f_{\text{НОМ}})$ .

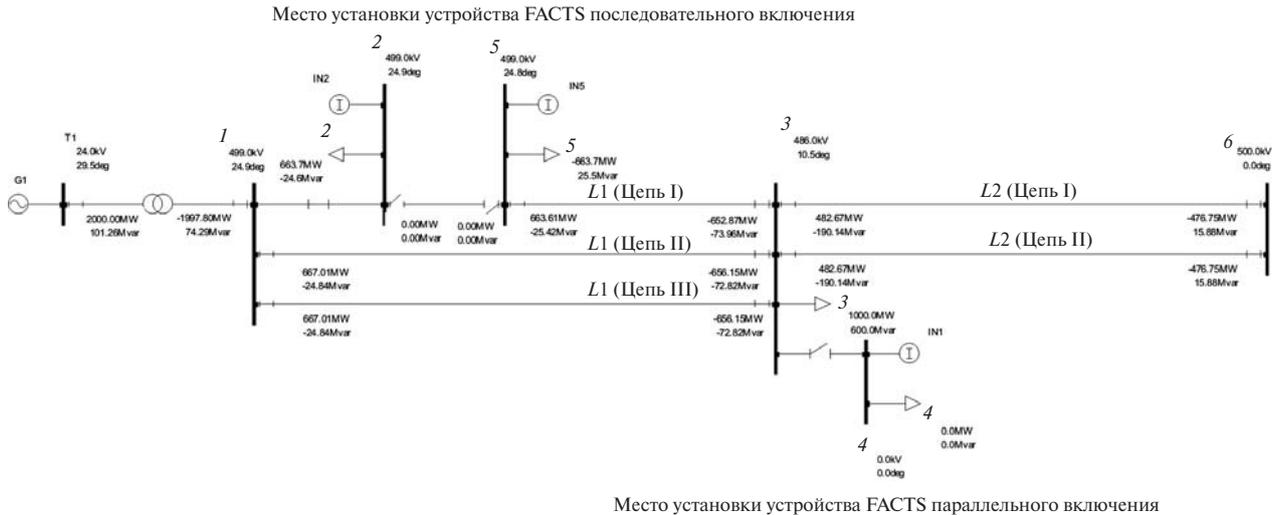


Рис. 8. Расчетная схема ЭЭС

Основные расчетные данные оборудования принимались в соответствии с [8].

Все расчеты проведены на динамической модели указанной ЭЭС с помощью ПК «Eurostag». Модель генератора описана полными уравнениями Горева—Парка, учтены модели системы возбуждения с АРВ СД и турбины с регулированием скорости вращения [4, 5]. В расчетах не учитывались потери активной мощности на коронирование ВЛ.

Устройства FACTS поочередно устанавливались либо последовательно в начало линии  $L_1$  (цепь I), либо параллельно на шины промежуточной подстанции в узел 3. Далее представлено сопоставление различных устройств FACTS при различных режимных расчетах.

**Расчет статической устойчивости.** Цель данного расчета — показать увеличение области статической устойчивости ЭЭС при работе устройств FACTS в предельных (номинальных) режимах работы [9]. Расчет был проведен для режима работы электропередачи, когда одна цепь выведена в ремонт:

Устройство FACTS	Предел статической устойчивости, МВт
Без FACTS	2300
УУПК 50 %, $Q_{ном} = 840$ Мвар	2750 (+19,5 %)
СТАТКОМ последовательного включения $Q_{ном} = 970$ Мвар:	
режим компенсации	2750 (+19,5 %)
режим «антикомпенсации»	2050 (-10,8 %)
ФПУ $Q_{ном} = 970$ Мвар:	
режим увеличения Dd	2450 (+6,5 %)
режим уменьшения Dd	2100 (-8,6 %)
СТАТКОМ параллельного включения $Q_{ном} = 450$ Мвар	2650 (+15,2 %)

Выбор мощности устройства УУПК проводился по току в линии  $L_1$  (цепь I) на основании предельного режима при 50%-й компенсации  $k$ :

$$Q_{УУПК} = 3I_{цI}^2 D U_C = 3I_{цI}^2 X_{Сном} = 3 \cdot 2,47^2 \cdot 45,6 \approx 840 \text{ Мвар.}$$

При выборе номинальной мощности устройства СТАТКОМ последовательного включения и ФПУ на базе ОРПМ с учетом сопротивления последовательно включенной обмотки высшего напряжения трансформатора была поставлена задача провести расчет при токе, равном номинальному току УУПК. С этой целью были определены параметры трансформатора:

$$E_{max} = I_{цI} X_{Сном} = 2,47 \cdot 45,6 = 112,6 \text{ кВ};$$

$$S_{тр.пс} = 3 E_{max} I_{цI} = 3 \cdot 112,6 \cdot 2,47 \approx 840 \text{ МВА};$$

$$X_{тр.пс} = \frac{U_{кз} (\sqrt{3} E_{max})^2}{100 S_{тр.пс}} = \frac{14,5 (\sqrt{3} \cdot 112,6)^2}{100 \cdot 840} \approx 6,6 \text{ Ом};$$

далее проводится перерасчет:

$$X_{Сном} = X_{Сном} + X_{тр.пс} + X_{зап} = 45,6 + 6,6 + 1 = 53,2 \text{ Ом}; E_{max} = 131,4 \text{ кВ}; S_{тр.пс} \approx 970 \text{ МВА}; X_{тр.пс} \approx 7,6 \text{ Ом.}$$

Мощность параллельно включенного устройства СТАТКОМ в промежуточной подстанции была принята равной 20% предела передаваемой мощности и соответствует 450 Мвар. Здесь также были учтены потери в трансформаторной группе 2' ТЦ-250000/500.

На основании результатов расчета можно отметить следующее.

1. При одинаковом режимном воздействии на ЭЭС требуется большая номинальная мощность устройства СТАТКОМ последовательного включения по сравнению с устройством УУПК.

2. Режим «антикомпенсации» устройства СТАТКОМ последовательного включения показывает

возможности данного устройства в соответствии с (5) при токе в линии, меньшем номинального значения.

3. Влияние устройства ФПУ на базе ОРПМ на статическую устойчивость ЭЭС несущественно и требует индивидуального расчета для каждой схемной структуры сети.

4. Расчет статической устойчивости для ОРПМ не проводился, так как данное устройство имеет двухпараметрическое регулирование, что требует знания алгоритма его управления с воздействием на  $Dd$  и  $DU$ . Однако динамическая модель последовательной части ОРПМ имеет возможность работать в режиме последовательного включения устройства СТАТКОМ, что наиболее эффективно при режимах работы ЭЭС, близких к пределу статической устойчивости.

**Расчет перераспределения потоков мощности между ЛЭП.** Расчет проводился для режима МДП при нормальном выводе в ремонт линии  $L_1$  (цепь III) и перетоке мощности 1600 МВт. В качестве возмущения использовалась разгрузка электростанции по активной мощности от технологической защиты на 600 МВт в течение 30 с. Регуляторы устройств FACTS при данном возмущении должны поддерживать исходную доаварийную активную мощность по «своей» линии  $L_1$  (цепь I), в начале которой они установлены.

Для сравнения полученных результатов при использовании УУПК, устройства СТАТКОМ последовательного включения, ФПУ и ОРПМ была отключена параллельная часть последнего, отвечающая за поддержание напряжения в узле I, при этом функция отбора (генерации) активной мощности в контур ПН1—ПН2 осталась.

Результаты расчета переходных процессов с устройствами продольной и комбинированной компенсации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип устройства FACTS	Исходные перетоки активной мощности $P_{цI} / P_{цIII}$ , МВт/МВт	Затраченный ресурс	Послеаварийные перетоки $P_{цI}^{па} / P_{цIII}^{па}$ , МВт/МВт	Значение $(P_{цI} - P_{цI}^{па})$ , МВт
Без FACTS	800/800	—	500/500	300
УУПК	800/800	$k = - 50\%$	650/350	150
СТАТКОМ последовательного включения	768/832	$E = - 65,7$ кВ $k = - 74,6\%$	768/232	0
ФПУ	768/832	$E = - 63,2$ кВ $Dd = 12^\circ$	768/232	0
ОРПМ	768/832	$E = - 71$ кВ $r = - 72^\circ$	768/232	0

Стоит отметить, что во всех расчетах перераспределения потоков мощности напряжение на выходном зажиме устройств не превышало наибольшего рабочего.

На основании полученных результатов расчета можно отметить следующее.

1. Устройство УУПК с задачей поддержания исходного перетока активной мощности по линии  $L_1$  (цепь I) не справилось. Так как устройство СТАТКОМ последовательного включения имеет возможность создавать ЭДС независимо от тока в линии, то необходимая процентная компенсация была достигнута.

2. Для данного режима и для заданной структурной схемы сети проблемы превышения напряжения на зажимах устройств не было и все преимущества устройства ФПУ не удалось продемонстрировать.

3. Устройством ОРПМ было стабилизировано исходное напряжение на выводе устройства с помощью использования дополнительной ЭДС  $E$  по сравнению с устройством СТАТКОМ и ФПУ.

**Расчеты динамической устойчивости.** Задачей является оценка вклада рассматриваемых устройств FACTS в повышение динамической устойчивости ЭЭС. В качестве меры устойчивости рассмотрено предельное время отключения трехфазного КЗ в начале линии  $L_1$  (цепь III) с ее отключением. Исходная схема электропередачи нормальная и имеет МДП 2000 МВт. С этой целью был реализован алгоритм управления устройствами FACTS в аварийных и переходных режимах, который заключается в «релейной форсировке» устройства по факту снижения напряжения на шинах электростанции. Продолжительность работы данного режима была принята равной 4 с.

Результаты расчета динамической устойчивости с учетом работы токовой защиты последовательных FACTS и без нее представлены в табл. 2.

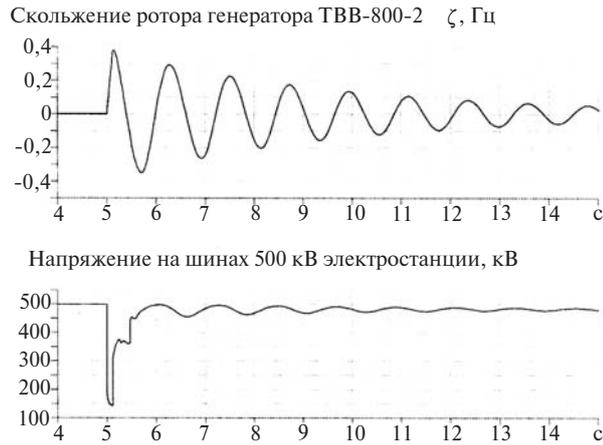
Таблица 2

Тип устройства FACTS	Предельное время отключения КЗ (с) с учетом токовой защиты (числитель) и без нее (знаменатель)	Примечание
Без FACTS	0,09/—	—
УУПК	0,12/0,14	Значение перегрузки $I_{цI} \gg 3,8$ кА в течение $\sim 1,2$ с
СТАТКОМ последовательное включение	0,12/0,13	Значение перегрузки $I_{цI} \gg 3,13$ кА в течение $\sim 1$ с
ФПУ	0,08/—	—
СТАТКОМ параллельное включение	0,12/—	—

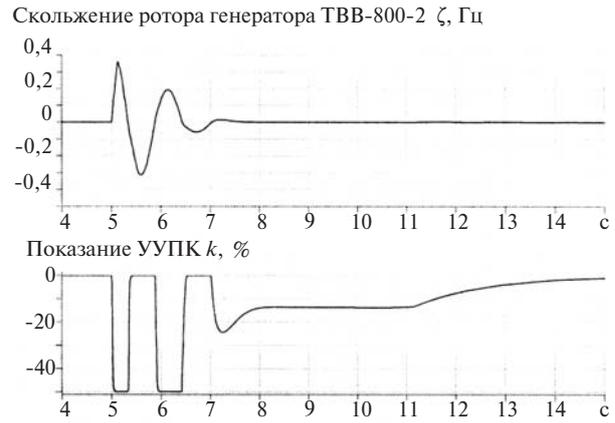
На основании полученных результатов расчета видно, что наибольший вклад в увеличение динамической устойчивости вносят УУПК и устройство СТАТКОМ последовательного включения при допустимой токовой перегрузке. Что касается устройства ОРПМ, то использование его ресурса ЭДС  $E_{max}$ , как это реализовано для нормальных режимов, нелогично, поэтому в данном случае, также как для статической устойчивости, рекомендуется

работа по принципу устройств СТАТКОМ последовательного включения.

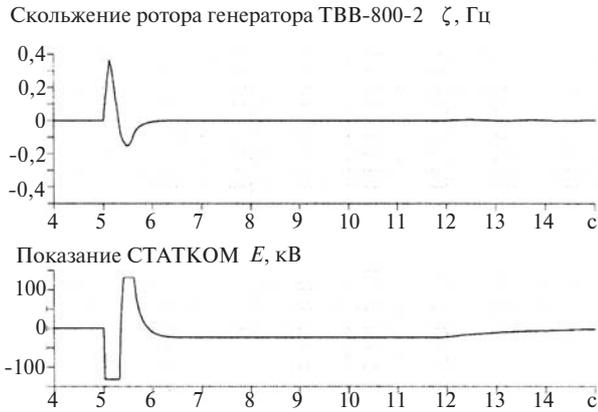
При исследовании также оценивалось влияние устройств FACTS на демпфирование ЭМК при реализации алгоритма управления в аварийных и переходных режимах в системе регулирования на отклонение скольжения ( $z = w_{Г} - w_{НОМ}$ ) ротора генератора электростанции в течение 4 с. В качестве возмущения принято нормативное возмущение



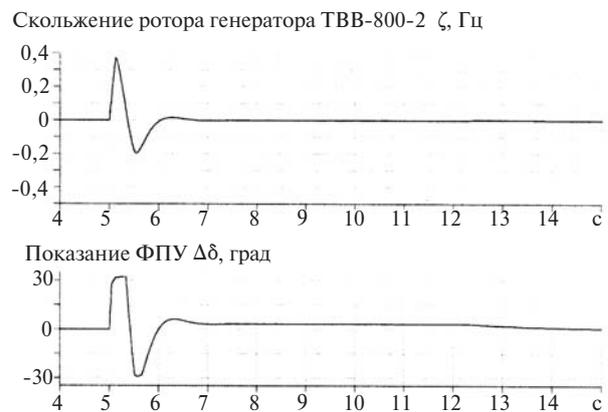
а)



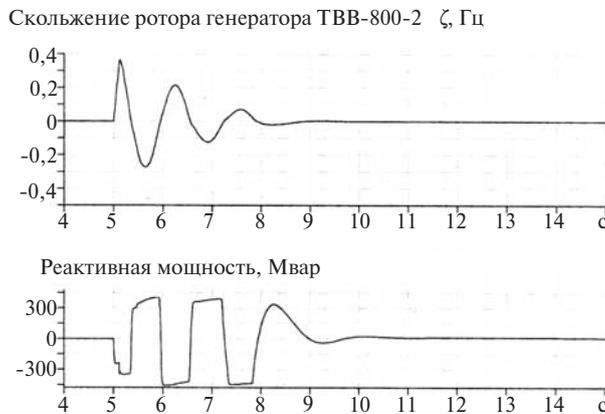
б)



в)



з)



д)

Рис. 9. Кривые переходного процесса при влиянии устройств FACTS на демпфирование ЭМК: а – без FACTS; б – УУПК; в – СТАТКОМ последовательного включения; з – ФПУ; д – СТАТКОМ параллельного включения

группы III в виде отключения повреждения ЛЭП действием УРОВ (0,35 с) при двухфазном КЗ (0,12 с) в начале линии  $L_1$  (цепь III) с отказом одного выключателя. На рис. 9 представлен переходный процесс с различными устройствами FACTS.

По результатам исследований видно, что наибольшее влияние оказывают двухсторонние устройства СТАТКОМ последовательного включения и ФПУ, так как они значительно гасят кинетическую энергию ротора генератора в момент торможения.

**Выводы.** Разработанные однолинейные математические и динамические модели энергосистем с учетом различных устройств FACTS. Целесообразно использовать на этапе технико-экономического обоснования установки устройств FACTS различных типов в реальной электроэнергетической системе, выбора мощности устройства, разработки алгоритма управления и системы регулирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Схема** и программа развития единой энергетической системы России на период 2011–2017 гг. — Приказ Минэнерго России от 29.08.2011 № 380.
2. **Hingorani N.G., Gyugyi L.** Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. Hoboken(USA): IEEE press, 2000.
3. **Кочкин В.И., Нечаев О.П.** Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: НЦ «ЭНАС», 2000.
4. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 3-е изд. — М.: «Высшая школа», 1978.
5. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем. — М.: Энергия, 1979.
6. **Eurostag.** Tutorial. Tractebel and Electricite de France, 1996.
7. **Основы** автоматического регулирования/Под ред. В.В. Солодовникова. — М.: Машгиз, 1954.
8. **Справочник** по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. — М.: НЦ «ЭНАС», 2005.
9. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. — Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.

[21.06.12]

*Автор: Лихачев Андрей Петрович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (ТУ) в 2009 г. Ведущий инженер Центра надежности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».*