



PS4 – S5-03



Традиционные алгоритмы и новые решения в области регулирования УУПК

Е.Н. КОЛОБРОДОВ¹, Я. ЗАКОНЫШЕК²

МЭИ (ТУ)¹, Relarte Ltd.²

Россия¹, Словения²

KolobrodovYN@mpei.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

FACTS, TCSC (УУПК), алгоритмы управления УУПК, гашение колебаний мощности.

1 ВВЕДЕНИЕ

Применение FACTS открывает широкие возможности для регулирования режима в электроэнергетической системе (ЭЭС). Наибольшее распространение на данный момент в мире получили управляемые устройства продольной компенсации (УУПК), реализованные на базе встречно-параллельного включения тиристоров. Уже построены и введены в работу воздушные линии (ВЛ) с УУПК в США, Бразилии, Швеции и других странах. Реализованные комплексы изменяют реактивное сопротивление ВЛ, на которую они устанавливаются, и позволяют:

- увеличить пропускную способность сети;
- повысить статическую и динамическую устойчивость системы;
- минимизировать потери в сети;
- устранить вероятность подсинхронного резонанса и др.

Основным элементом, обеспечивающим заявленные возможности УУПК, является устройство, задающее степень компенсации ВЛ для УУПК. В рамках доклада рассмотрены и проанализированы традиционные технические решения в области разработки алгоритмов регулирования степенью компенсации для УУПК и предложен новый метод управления устройством продольной компенсации в переходных режимах. Указанный метод реализован на базе анализа угловой характеристики мощности электропередачи и обеспечивает эффективное гашение колебаний вне зависимости от текущей степени компенсации и частоты колебаний параметров режима.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Традиционные решения в области регулирования УУПК

Управляемое устройство продольной компенсации, реализованное на базе встречно-параллельного включения тиристоров, включает конденсаторную батарею (КБ) с фиксированной величиной емкостного сопротивления и реактор с тиристорным блоком, подключенные к КБ параллельно. Изменение угла открытия тиристоров в тиристорном блоке в широком диапазоне (от 90° до 180° относительно напряжения на КБ) позволяет варьировать ток в реакторе, что приводит к увеличению или уменьшению падения напряжения на КБ и, соответственно, сопротивления УУПК.

Эффективность работы УУПК существенно зависит от выбора регулятора. Как отмечено в [1] условно регулятор степени компенсации ВЛ для УУПК делят на две части (рис. 1):

- 1) модуль, обеспечивающий задание степени компенсации ВЛ с УУПК;
- 2) модуль непосредственного управления тиристорами УУПК.

Первый модуль отвечает за определение необходимой степени компенсации ВЛ с УУПК. Второй модуль непосредственно определяет угол открытия тиристоров и выдает импульсы управления на открытие тиристоров УУПК.

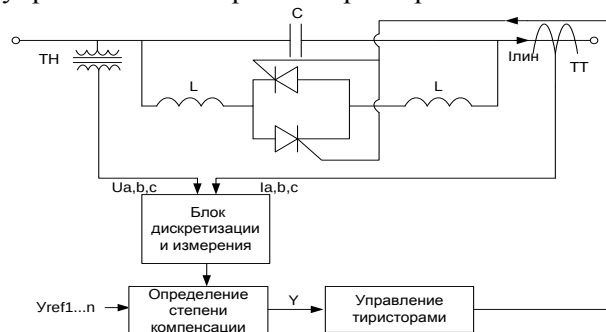


Рис. 1: Структура управления тиристорным модулем УУПК

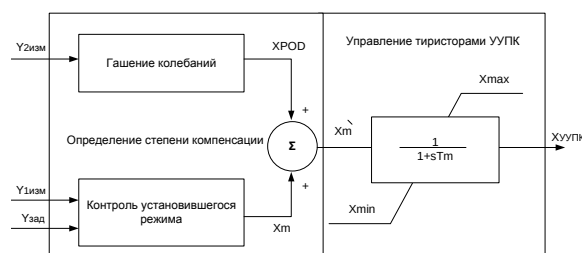


Рис. 2: Традиционный алгоритм регулятора УУПК

На основе анализа ряда документов [1-5], рассматривающих алгоритмы регулирования УУПК, в первом модуле выделены две составляющие, отвечающие за определение степени компенсации в установившемся режиме и гашение колебаний в ЭЭС в переходных процессах соответственно (рис. 2).

Для блока контроля установившегося режима обычно применяют или прямое задание степени компенсации ВЛ из системы верхнего уровня (сигнал непосредственно от оператора или от системы автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ)) или локальное регулирование на основе подачи на пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор величины расхождения контролируемого локального параметра с заранее заданной величиной. В качестве контролируемых параметров наибольшее распространение получили мощность, передаваемая по ВЛ, или косвенное определение угла δ по концам ВЛ с УУПК на базе контроля тока ВЛ в месте установки УУПК.

Группа алгоритмов, обеспечивающих гашение колебаний, в моменты, когда передающая часть энергосистемы разгоняется (механический момент больше электрического), увеличивает пропускную способность и, следовательно, реализует передачу большей мощности. Аналогичный процесс происходит при торможении ЭЭС (электрический момент на валу турбины больше механического), но в этом случае происходит снижение пропускной способности и, соответственно, передаваемой мощности. Это приводит к возникновению дополнительного момента на валу ротора эквивалентного генератора передающей части энергосистемы, действие которого противоположно направлению ускорения или торможения, что и обеспечивает быстрое гашение колебаний в ней. В большинстве случаев для реализации алгоритма гашения колебаний в одноименном блоке используют дифференцирующее звено с последующим усилением входного измеряемого сигнала (рис. 3).

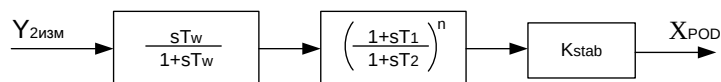


Рис. 3. Традиционный алгоритм гашения колебаний (дифференцирование входного сигнала)

Применение реально дифференцирующего звена позволяет зафиксировать возникновение колебаний и нивелировать влияние постоянной составляющей во входном сигнале. Фазоповоротные блоки с заранее заданными фазочастотными характеристиками компенсируют отставание фазы входного сигнала относительно выходного сигнала. На выходе алгоритма устанавливается пропорциональное звено для усиления управляющего воздействия (X_{POD}), которое корректирует величину X_m алгоритма контроля установившегося режима. Величина n определяется входным сигналом в соответствии с полученными результатами исследования устойчивости. Исходя из требования локализации измерений, в качестве входных сигналов для подобных алгоритмов применяют ток, протекающий по линии, или передаваемую по ВЛ с УУПК мощность [2, 3].

Другим интересным решением в рассматриваемой области является алгоритм, основанный на определении управляющего воздействия, исходя из величин средней и колебательной составляющих контролируемого параметра, имеющих заранее заданную частоту (рис. 4).

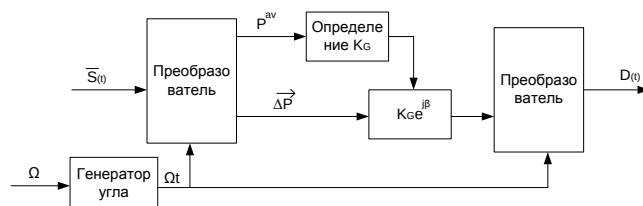


Рис. 4: Традиционный алгоритм гашения колебаний (выделение колебательной составляющей)

Работоспособность рассмотренных выше алгоритмов подтверждена рядом исследований [5] и внедрений в различных странах мира. Однако, анализ комплексов, включающих предложенные алгоритмы, показал наличие следующих недостатков:

- неполное использование для ряда алгоритмов (см. рис. 3) всех возможностей регулирования в части демпфирования колебаний в моменты ускорения и торможения вала ротора эквивалентного генератора передающей части ЭЭС в случае, когда степень компенсации ограничивается диапазоном регулирования (в указанных режимах фазоворотные блоки не полностью позволяют компенсировать отставание фазы входного сигнала от выходного);
- существенное ограничение для ряда алгоритмов (см. рис. 4) диапазона регулирования по частоте качаний входного сигнала;
- большой объем расчетов и необходимость проведения исследований на динамических моделях ЭЭС с УУПК для подтверждения правильности выбора параметров.

Таким образом, предлагаемые традиционные алгоритмы не универсальны, не обеспечивают гашение колебаний в широком диапазоне частот и требуют совершенствования.

2.2 Усовершенствованный метод гашения колебаний

Исходя из новых возможностей, открывающихся при использовании микропроцессорных устройств в противоаварийной и режимной автоматике, видоизменена структура модуля, обеспечивающего задание степени компенсации ВЛ с УУПК (рис. 5). В предлагаемом варианте работа блоков управления установившимся режимом и блока гашения колебаний не совмещается на время колебаний.

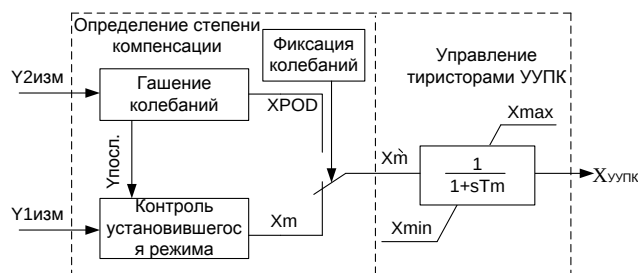


Рис. 5: Предлагаемая структура регулятора УУПК

Регулирование в установившемся режиме осуществляется по алгоритмам, описанным выше для блока контроля установившегося режима, т. е. блок поддерживает постоянным выбранный параметр режима. После гашения колебаний и повторного ввода рассматриваемого блока происходит корректировка величины уставки, с которой сравнивается контролируемый параметр. Изменение параметра происходит за счет получения информации о новом установившемся режиме (степень компенсации, уровень мощности, передаваемой по ВЛ с УУПК, или тока) от блока гашения колебаний при отсутствии АПНУ или непосредственно от АПНУ.

Фиксация колебаний и смена алгоритмов регулирования основывается на сравнении контролируемого параметра (значения мощности) с заданными границами диапазона, определяющими зону нечувствительности. При выходе контролируемого параметра из зоны

нечувствительности установившегося режима происходит вывод из работы блока контроля установившегося режима и ввод блока гашения колебаний. Вывод из работы блока гашения колебаний происходит при длительном нахождении выбранного параметра (мощность или угол δ) в рамках новой зоны нечувствительности, при этом границы указанной зоны относительно определенного параметра установившегося послеаварийного режима могут быть значительно уже, чем при фиксации качаний в момент ввода алгоритма гашения колебаний в работу.

В переходном режиме алгоритм управления УУПК для блока гашения колебаний основан на анализе параметров угловой характеристики мощности электропередачи на каждом шаге дискретизации. Поясним работу алгоритма гашения колебаний на примере схемы (рис. 6), включающей станцию, имеющую местную нагрузку и соединенную с остальной системой двумя воздушными линиями. Для простоты и наглядности предлагаемого принципа принимаем, что на станции G автоматика, обеспечивающая кратковременную и длительную разгрузку турбины (автоматика регулирования частоты и мощности турбины (АРЧМ)), отсутствует или выведена из работы. В этом случае при возникновении возмущения, как на станции, так и на воздушных линиях и его последующей ликвидации наблюдается переходный режим, характеризующийся качаниями мощности, передаваемой по связи между станцией и ШБМ, и угла δ между эквивалентными ЭДС. Зависимость между мощностью, передаваемой по ВЛ1, и углом δ между векторами напряжений по концам ВЛ1 с УУПК представлена соотношением (1) [6].

Уменьшение площади ускорения после ввода блока гашения колебаний в работу происходит с помощью управления УУПК регулятором на базе метода фиксации в уравнении (1) угла δ между векторами напряжений по концам ВЛ1 в предшествующем возмущению установившемся режиме ($\delta_{вл1\text{исх}}$) и расчета требуемой степени компенсации, необходимой для доведения текущего значения угла δ между векторами напряжений по концам ВЛ1 ($\delta_{вл1}(t)$) до доаварийного значения при условии сохранения неизменной измеренной мощности (рис. 7). В этом случае закон, определяющий изменение степени компенсации ВЛ, представляется в виде физически реализуемого решения квадратичного уравнения (2), получаемого из уравнения (1) путем его преобразования относительно сопротивления X линии ВЛ1 с учетом подставляемых в него величин $P_{ВЛ1(t)}$ и $\delta_{вл1\text{исх}}$. Нарастание степени компенсации при предлагаемом законе регулирования происходит постепенно в связи с увеличением отклонения текущего угла $\delta_{вл1}(t)$ относительно величины $\delta_{вл1\text{исх}}$. Окончание регулирования по указанному выше принципу происходит в момент окончания первого торможения.

Далее при каждом последующем разгоне (торможении) ротора эквивалентного генератора станции в алгоритме блока гашения колебаний УУПК происходит оценка параметра $P_{ВЛ1\text{уст посл}}$ (мощности нового установившегося режима) по данным предшествующего качания и фиксация в уравнении (1) мощности, соответствующей новому установившемуся режиму (рис. 8). Это достигается путем замены в уравнениях (3)-(5) величин P_3 и δ_3 на $P_{ВЛ1\text{уст посл}}$ и $\delta_{вл1}(t)$. При этом решение уравнения (2) в начальный момент регулирования дает предельную величину степени компенсации, необходимую для доведения величины мощности при текущем уровне угла $\delta_{вл1}(t)$ до значения $P_{ВЛ1\text{уст посл}}$. Расчетная величина в начальный момент регулирования существенно отличается от текущего физического значения на УУПК. Далее наблюдается приближение текущего значения степени компенсации УУПК к требуемому. Изменение степени компенсации ведется до момента совпадения текущей степени компенсации с требуемой. За счет чего и возникает дополнительный момент на валу ротора эквивалентного генератора передающей части энергосистемы (G). Далее до следующего момента пуска алгоритма фиксируется полученная в момент совпадения величина степени компенсации на УУПК. При этом очевидно, что предлагаемое решение не зависит как от частоты колебательного процесса, так и от выхода на предельные уровни регулирования УУПК в связи с отсутствием фазоповоротных блоков и задатчика угла, определяющего работу алгоритма (см. рис. 4).

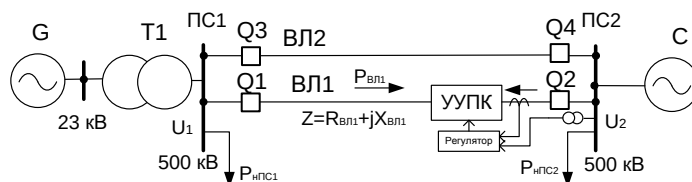


Рис. 6: Схема ЭЭС

$$\frac{U_1 U_2 X_{B/L1} \sin \delta_3}{X_{B/L1}^2 + R_{B/L1}^2} + \frac{U_1 U_2 R_{B/L1} \cos \delta_3}{X_{B/L1}^2 + R_{B/L1}^2} - \frac{U_2^2 R_{B/L1}}{X_{B/L1}^2 + R_{B/L1}^2} = P_3 \quad (1)$$

$$A_2 x^2 + A_1 x + A_0 = 0, \quad (2)$$

$$A_2 = P_3 \quad (3)$$

$$A_1 = -U_1 U_2 \sin \delta_3 \quad (4)$$

$$A_0 = -U_1 U_2 R_{B/L1} \cos \delta_3 + U_2^2 R_{B/L1} + P_3 R_{B/L1}^2 \quad (5)$$

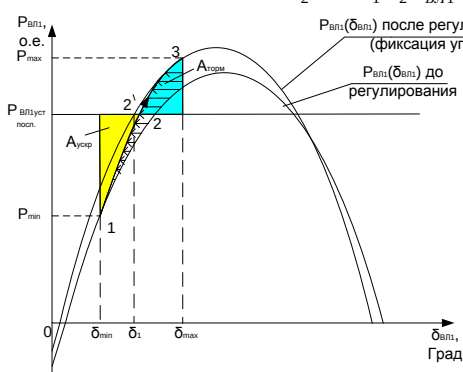


Рис. 7: Изменение угловой характеристики для ВЛ1 при фиксации алгоритмом угла

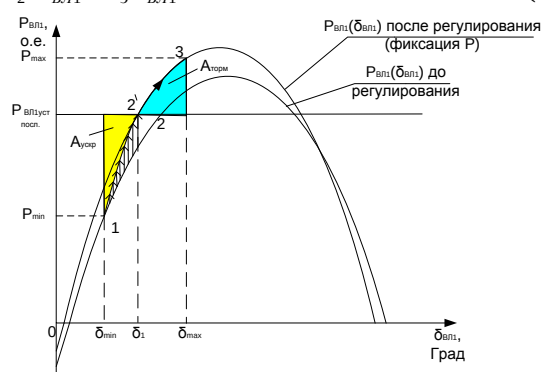


Рис. 8: Изменение угловой характеристики для ВЛ1 при фиксации алгоритмом мощности

При реализации предлагаемого решения в виде алгоритма регулятора УУПК на первое место вышел вопрос информационной обеспеченности локального устройства требуемыми параметрами. Параметры уравнения (2) U_1 , U_2 и $\delta_{эл1(t)}$ при обоих вариантах регулирования получены с определенной погрешностью путем моделирования удаленной точки, которое с успехом применяют для реализации устройств автоматики ликвидации асинхронного хода (АЛАР) ряда отечественных [7] и зарубежных производителей [8]. Для оценки величины мощности нового установившегося режима предложено решение в виде оценки параметра $P_{B/L1 \text{ уст. посл.}}$ на базе расчета двух площадей на угловой характеристике мощности электропередачи В1 и В2 ((6) и (7)) и предположения о консерватизме рассматриваемой системы в течение полупериода (отсутствие рассеивания энергии). В этом случае справедливо уравнение (8) (рис. 9). Подставляя в уравнение (8) уравнение (7) с учетом (6) получим уравнение (9), оценивающее мощность нового установившегося режима на каждом полупериоде.

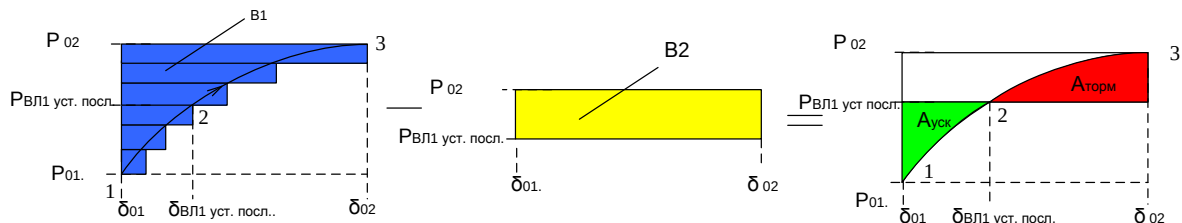


Рис. 9: Графическое представление метода расчета $P_{B/L1 \text{ уст. посл.}}$

$$B1 = \int_{\delta_{01}}^{\delta_{02}} (P_{02} - P_{(t)}) d\delta = \sum_{t=t_{01}}^{t_{02}} (P_{(t)} - P_{(t-1)}) (\delta_{(e)} - \delta_{01}) \quad (6)$$

$$B2 = (P_{02} - P_{B/1уст.посл.}) (\delta_{02} - \delta_{01}) \quad (7)$$

$$B1 - B2 = A_{уск} - A_{торм} = 0 \quad (8)$$

$$P_{B/1уст.посл.} = P_{02} - \frac{B1}{\delta_{02} - \delta_{01}}, \text{ где} \quad (9)$$

(δ_{02}, P_{02}) – конечная точка интегрирования (границная точка колебаний (точка 3 см. рис. 9));

(δ_{01}, P_{01}) – начальная точка интегрирования (границная точка колебаний (точка 1 см. рис. 9)).

Предлагаемый метод обеспечивает гашение колебаний в широком диапазоне частот с максимальным и с точно рассчитанным для конкретного возмущения управляющим воздействием в начальный момент каждого ускорения (торможения), что повышает статическую и динамическую устойчивость ЭЭС и облегчает требования к временам срабатывания комплексов РЗА, устанавливаемых на линиях с УУПК.

2.3 Проведенные испытания

Проведено исследование работоспособности предлагаемого решения и сравнение полученных результатов с результатами работы алгоритмов гашения колебаний, основанных на традиционных принципах. Испытания проводились в программе PSCAD для схемы, включающей станцию, имеющую местную нагрузку и соединенную с остальной системой двумя воздушными линиями (см. рис. 6). В целом предлагаемый метод позволяет в большинстве случаев обеспечить за меньшее число циклов гашение колебаний в более широком диапазоне возмущающих воздействий.

В качестве примера представлены осциллограммы процесса, возникающего при наличии возмущающего процесса в виде внезапного отключения линии ВЛ2 для двух случаев загрузки станции. На рис. 10 представлены колебания мощности, возникающие в переходном процессе для случая наличия традиционного регулятора УУПК, реализованного на базе дифференцирования измеряемого тока линии ВЛ1. На рис 11 представлена работа регулятора УУПК, основанного на новом выше изложенном принципе. Из осциллограмм видно, что в связи с отсутствием влияния частоты колебаний на работу нового алгоритма его эффективность не зависит от режима ЭЭС, при котором произошло возмущение.

Планируется проведение ряда испытаний, связанных с рассмотрением работы алгоритма для более сложной неоднородной сети, определением влияния различных погрешностей и ряда других факторов на работу предлагаемого метода гашения колебаний с последующей разработкой промышленного алгоритма регулирования степени компенсации УУПК и всей необходимой документации.

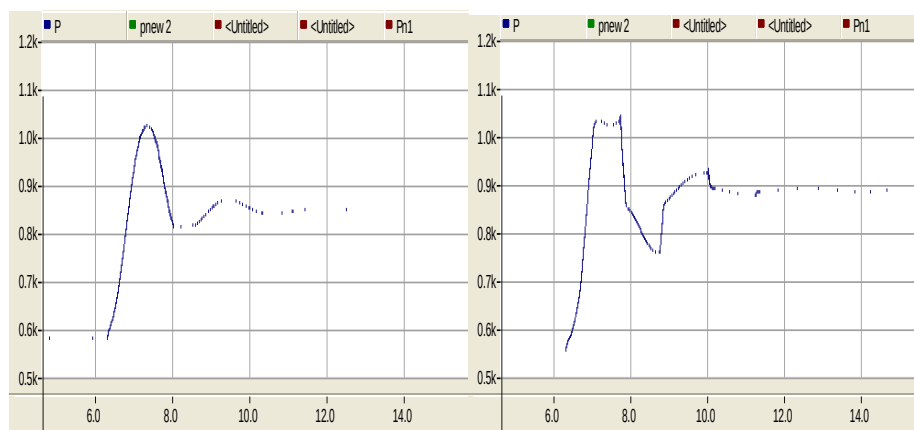


Рис. 10а: Традиционный алгоритм
($\delta=0,65$ рад)

Рис. 11а: Усовершенствованный
алгоритм ($\delta=0,65$ рад)



Рис. 106: Традиционный алгоритм
($\delta=0,45\text{рад}$)

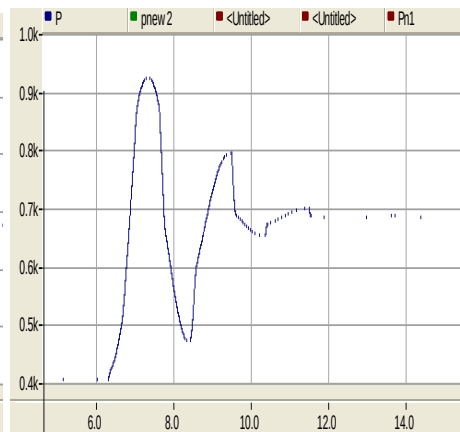


Рис. 116: Усовершенствованный алгоритм
($\delta=0,45\text{рад}$)

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Предложен и исследован новый метод управления устройством продольной компенсации в переходных режимах, реализованный на базе анализа угловой характеристики мощности электропередачи, обеспечивающий эффективное гашение колебаний вне зависимости от текущей степени компенсации и частоты колебаний параметров режима. Это обеспечивается расчетом требуемого уровня компенсации и приближения текущей величины степени компенсации к расчетному значению по гиперболическому закону регулирования. В результате исследований установлено, что время переходного процесса уменьшается в 1,5-2 раза. Кроме этого обеспечивается расширение допустимого диапазона возможных возмущений и их длительности, при которых сохраняется высокая эффективность работы устройства.
- 2) Предложен и разработан способ получения данных для оценки величины установившегося значения передаваемой мощности в последующем установившемся режиме на базе допущения о выполнении условия консерватизма частей электроэнергетической системы на каждом полупериоде и измеренных значениях энергии ускорения и торможения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission System. Wiley-IEEE Press, 2002.
- [2] A. Del Rosso, C. A Canizares and V.M. Dona. A study of TCSC controller design for power system stability improvement. IEEE Trans. Power Systs., vol-18, pp. 1487-1496, 2003.
- [3] A. Del Rosso, C. A Cañizares, V. Quintana, and V. Doña. Stability Improvements Using TCSC in Radial Power Systems. Proc. North American Power Symposium (NAPS), Waterloo, October 2000.
- [4] N. Martins, H.J.C.P. Pinto and J.J. Paserba. TCSC Controls for Line Power Scheduling and System Oscillation Damping - Results for a Small Example System. Proceedings of 13th Power System Computation Conference (PSCC), Trondheim. Norway, June 1999.
- [5] L. Ängquist, C. Gama. Damping Algorithm based on Phasor Estimation. Paper 0-7803-6674-3, 2000 IEEE (IEEE PES WM 2001 paper 63-04).
- [6] Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: изд. «Высшая школа», 1970 г.
- [7] Наровлянский В.Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы. М.: Энергоатомиздат, 2004 г.
- [8] D. Reimert. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, CRC Press, 2006.