УДК 62-346

# ОТРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫСОКОТОЧНОГО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ К СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

**Чубаров Ф.Л., Сизов А.Н., Быков А.И.**

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru*

В статье затронуты вопросы, связанные с проектированием одного из наиболее ответственных узлов в составе современных систем регулирования паровых турбин. Статья опирается на ранее опубликованные по той же теме материалы и описывает построенную математическую модель «электромеханический привод + отсечной золотник», при этом гидравлическая часть системы ограничивается лишь присоединённой массой к выходному штоку электромеханического привода. В работе были рассмотрены способы обеспечения высокоскоростных линейных перемещений с прецизионным позиционированием паровпускного регулирующего клапана турбины, для чего предложена математическая модель следящего электромеханического привода. Делается вывод о том, что разработанная модель может быть использована, как базовая при проектировании или выборе типоразмера электромеханического привода под заданные условия эксплуатации.

**Ключевые слова: следящий привод, отсечной золотник, паровая турбина, система регулирования, регулирующий клапан**

# WORKING OUT OF THE HIGH-SPEED HIGH-PRECISION TRACKING ELECTROMECHANICAL DRIVE-UNIT-MODEL TO APPLY FOR A STEAM TURBINE CONTROL SYSTEM

**Chubarov F.L., Sizov A.N., Bykov A.I.**

*KB BMSTU, Kaluga, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru*

The article touched upon issues related to the design of one of the most important units in the composition of modern control systems of steam turbines. The article is based on previously published on the same subject material and enough detail the construction of a mathematical model of the «cut-off electromechanical actuator + valve», despite the fact that the hydraulic part of the system is limited to a shut-off spool (the attached weight to the output shaft EMA). In work ways of ensuring high-speed linear movements with precision positioning of the adjusting valve of steaming of the turbine have been considered for what the mathematical model of the watching electromechanical drive is offered. The conclusion that the developed model can be used as basic at design or the choice of a standard size of EMA under the set service conditions is drawn.

**Keywords: servo drive, shut-off valve, steam turbine, control system, a control valve**

В продолжение проработки вопросов применения электромеханических приводов (ЭМП) в управляющих контурах малоинерционных объектов регулирования [6,7] рассмотрены результаты моделирования в сравнении с результатами испытаний натурного ЭМП. Предложенная ранее совместная модель ЭМП и гидравлического блока регулирования в составе контура регулирования давления и частоты вращения паровой турбины показала свою адекватность, необходимо продолжение исследования.

**Целью** исследования является разработка новой модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода.

## Материалы и методы исследования

В рамках исследования динамических процессов в контуре системы автоматического регулирования паровой турбины ранее было выполнено:

– рассмотрены способы обеспечения высокоскоростных линейных перемещений с прецизионным позиционированием рабочего органа – паровпускного регулирующего клапана, и выделены преимущества ролико-винтовой пары [6];

– предложена математическая модель следящего электромеханического привода, конструктивно способного с заданной скоростью и точностью управлять положением промежуточного усилительного элемента – отсечного золотника в составе исполнительного гидравлического механизма (блока регулирования) паровой турбины [7].

Рассмотренная математическая модель ЭМП составлена по опытному образцу привода, спроектированному и изготовленному ЗАО «Диаконт» (г. С.-Петербург) [8] для применения в энергетике, в т.ч. в системах регулирования частоты вращения паровых турбин ОАО «КТЗ» (г. Калуга). Характерной особенностью их является применение гидравлического исполнительного механизма – гидромеханического блока регулирования – для управления положением паровпускных регулирующих клапанов парораспределения турбины [2, 3]. Ход клапанов определяет расход свежего пара на турбину (рис. 1), однако действующие при этом паровые усилия имеют непостоянный, циклический и даже зачастую знакопеременный характер (рис. 2), что и определяет, главным образом, максимальную нагрузку на исполнительные органы блока регулирования в момент отрыва клапана от своего седла. Такое распределение усилий, которые необходимо преодолевать, по возможности, плавно – без рывков, в свою очередь, и обуславливает применение в его конструкции про-

межуточного усилительного звена – гидравлического отсечного золотника под управлением своего ЭМП.

Таким образом, рассматриваемый следящий привод входит в состав блока регулирования системы автоматического регулирования паровой турбины (САР ПТ), предназначенного для преобразования электрического сигнала управления от электронной управляющей части (ЭУЧ) САР ПТ, в перемещение сервомоторов (СМ), создающих необходимое усилие для перемещения регулирующих клапанов (РК).

Технические требования к функционалу современных контуров автоматического регулирования теплофизических параметров турбины, таких как давление свежего пара или частота вращения ротора, определяют достаточно высокие требования и к комплектующему их оборудованию. Как из расчётного обоснования [3], так и из практического опыта эксплуатации можно утверждать, что для контуров рассматриваемого типа (электрогидравлические) достаточным для обеспечения качественной и безопасной работы будет применение ЭМП со следующими характеристиками:

– постоянная времени (перемещение на полный рабочий ход при максимальном входном управляющем сигнале – важный компонент противоразгонной защиты турбоагрегата) – не более 0,1 сек;

– погрешность позиционирования – не более 0,1 мм;

– развиваемое усилие – не менее 1 кН.

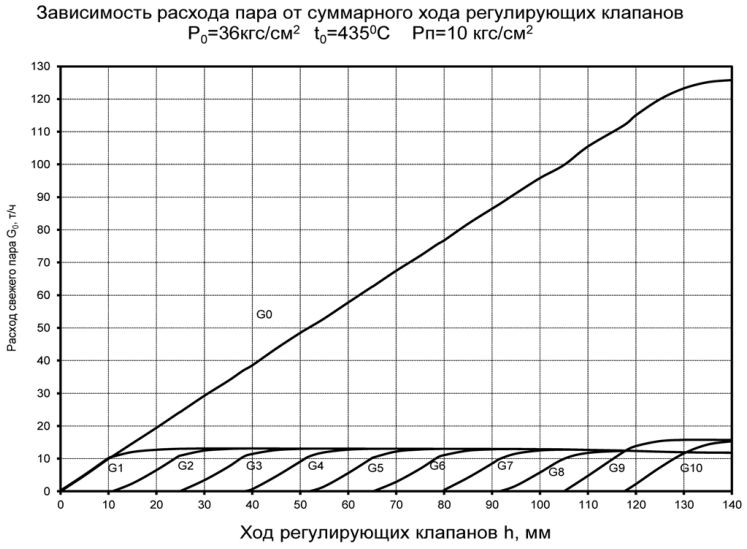


*Рис. 1. Пример зависимости расхода пара на турбину по мере открытия регулирующих клапанов*

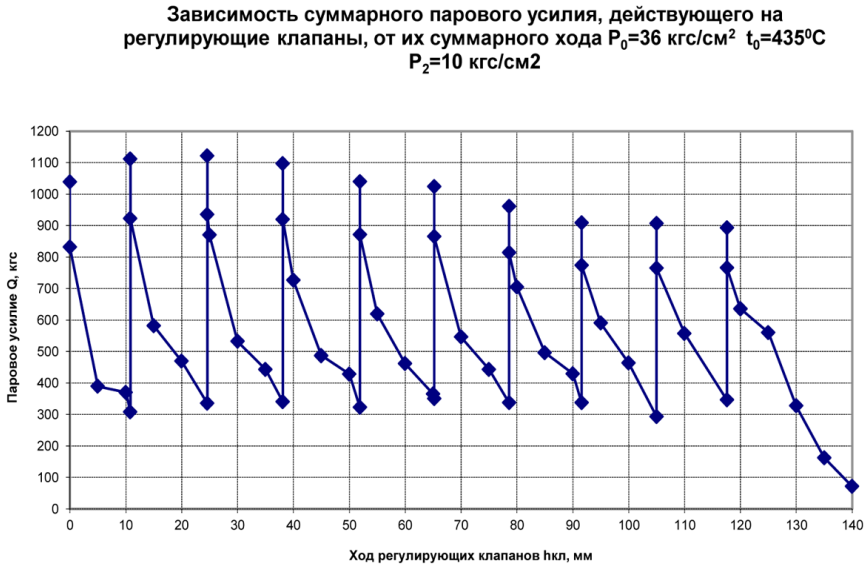


*Рис. 2. Пример зависимости парового усилия, действующего на регулирующие клапаны, по мере их открытия*

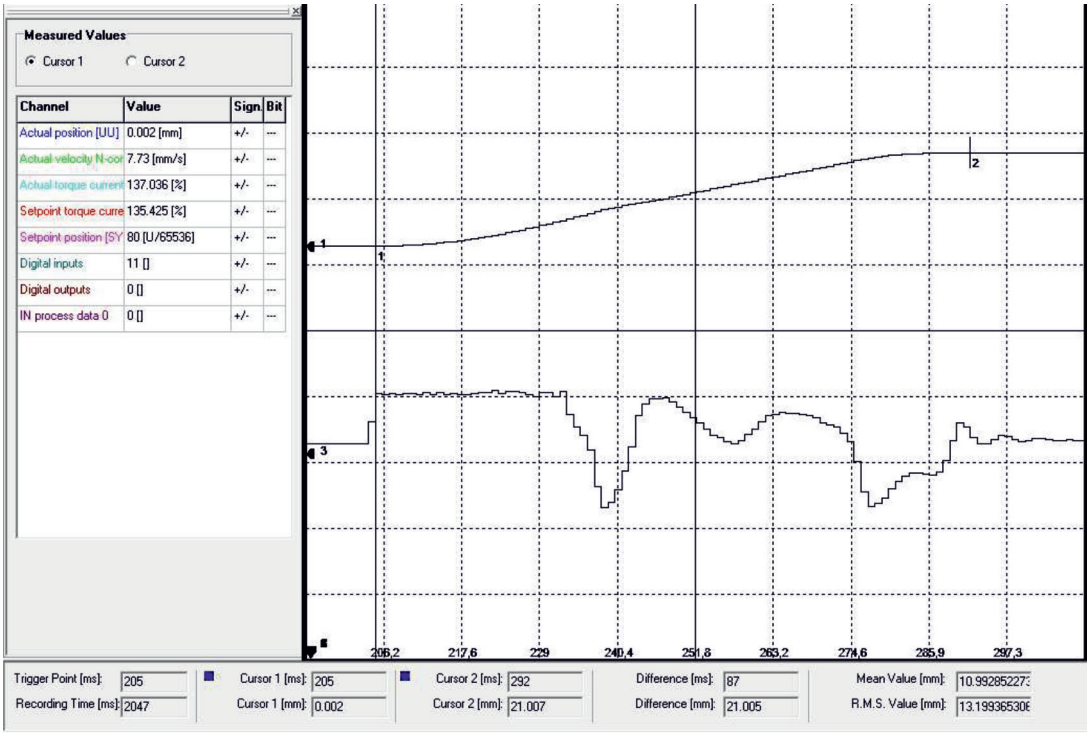


*Рис. 3. Форсированное перемещение штока ЭМП на рабочий ход в мм, где метки «1» и «2» указывают на, соответственно, начало и конец перемещения*

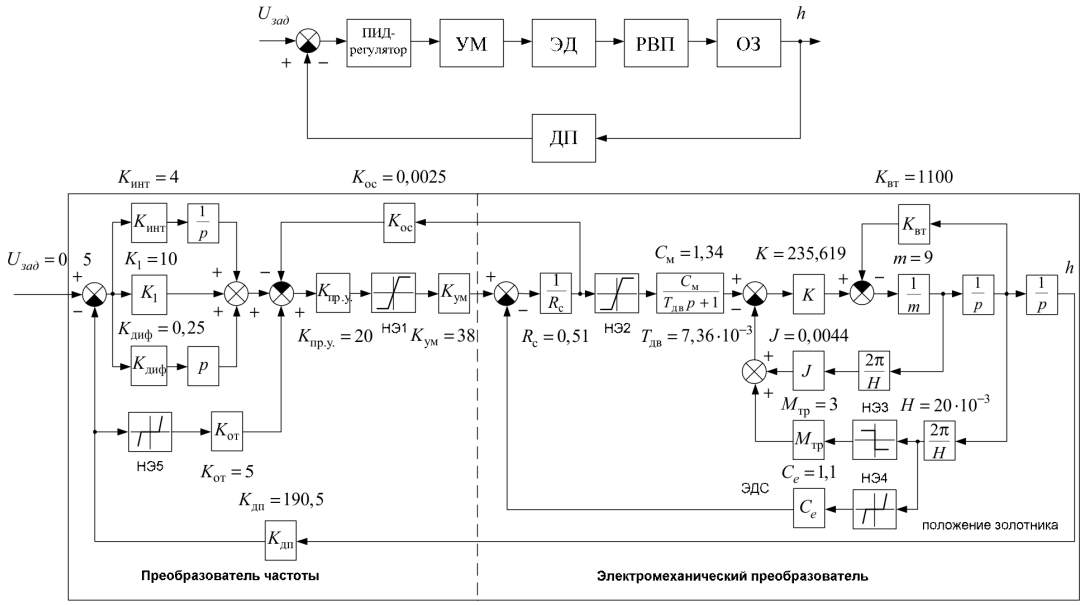


*Рис. 4. Функциональная и структурная схемы следящего привода отсечного золотника, со следующими условными обозначениями: УМ – усилитель мощности, ЭД – электродвигатель, РВП – ролико-винтовая передача, ОЗ – отсечной золотник, ДП – датчик положения*

При этом следует понимать, что указанные величины достаточно условны и осреднены по рабочему диапазону, т.к. в каждом конкретном случае они не только зависят от конкретных требований к качеству работы всего контура регулирования, но и сами влияют на его качество (точность и быстродействие) в существенной степени. Отсюда, помимо теоретической задачи синтеза оптимального регули-

рования, возникает и более практическая, инженерная задача – на этапе проектирования контура подобрать из существующего типоразмерного ряда ЭМП с такими параметрами быстродействия и точности, чтобы контур в целом смог удовлетворить по ним требованиям ТЗ.

Не рассматривая здесь первую часть задачи (методам её решения, в т.ч. и в нелинейной постановке, посвящено значительное количество работ, к примеру, [5]), уделим внимание практическим вопросам подбора и проверки необходимого оборудования, а также подтверждения параметров ранее разработанной математической модели привода [6–8].

В обеспечение решения данной задачи и в целях верификации модели ЭМП [7, 8] изготовителем отечественных образцов ЭМП данного типа (ЗАО «Диаконт», [1]) на образце типа EMD-100 (300) был проведен ряд функциональных испытаний по программам [4], в т.ч. проверкам подвергалась:

– работоспособность ЭМП (перемещение штока ЭМП в заданное положение 1–25 мм со скоростью не более 10 мм/сек; при этом точность позиционирования должна быть не хуже ± 0,1 мм, а потребляемый ток не должен превышать 50 А);

– точностные характеристики ЭМП (перемещение штока ЭМП в заданное положение 1–25 мм со скоростью не более 1 мм/сек; при этом точность позиционирования должна быть не хуже ± 10 мкм);

– обеспечение «форсированного» режима – заданной скорости перемещения при наложении нагрузки на выходном штоке ЭМП (перемещение штока ЭМП в заданное положение 1–25 мм со скоростью не менее 220 мм/сек при воздействии на него постоянной нагрузки в 1 кН; при этом время перемещения не должно превышать 0,1 сек).

При этом использовалось вспомогательное оборудование:

– для управления ЭМП (задания величины и скорости перемещения), а также регистрации выходных параметров (положения его рабочего органа и величины потребляемого тока) использовался технологический компьютер со специальным ПО;

– механический стенд для создания заданной нагрузки на ЭМП (~ 1 кН) при помощи пневмоцилиндра.

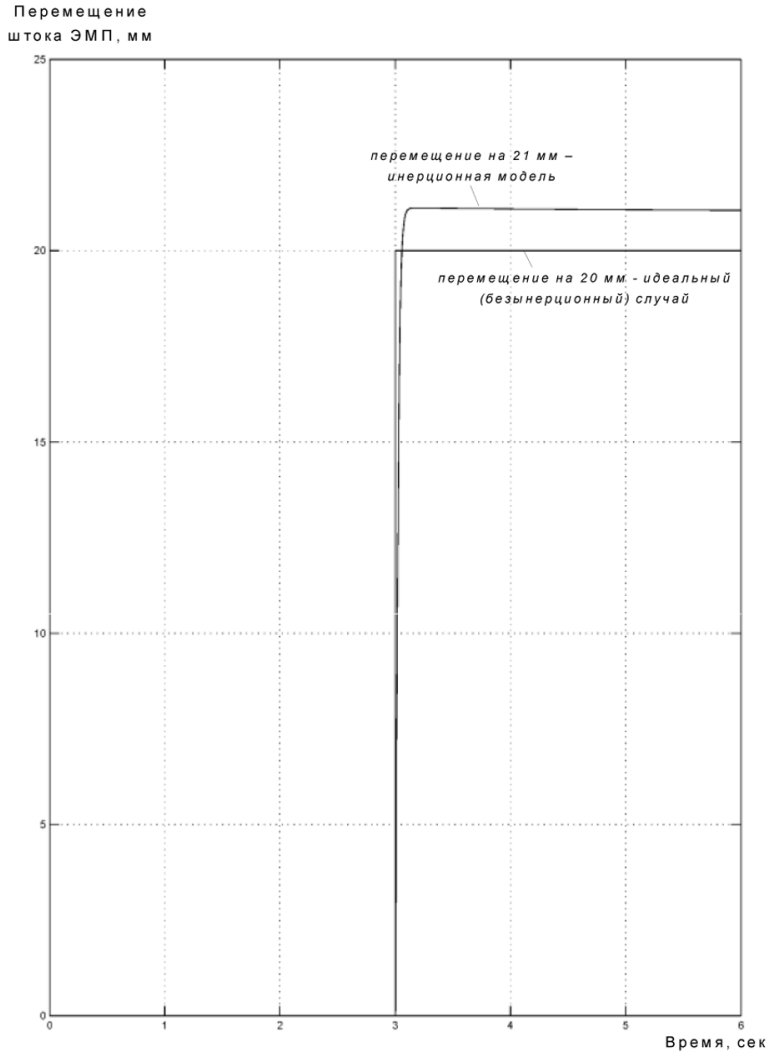


*Рис. 5. Результат моделирования форсированного перемещения штока ЭМП на рабочий ход*

## Результаты исследования и их обсуждение

В результате испытаний все заданные к ЭМП требования были подтверждены снятыми характеристиками. С точки зрения обеспечения безаварийной работы турбины, наиболее важна среди них именно последняя – проверка возможности максимально быстрого перемещения ЭМП на полный рабочий ход с присоединённой (статической) нагрузкой, учитывающей как массу подвижных частей (в т.ч. и отсечного золотника (О)З, жёстко пристыкованного к ЭМП), так и трение сопрягаемых поверхностей (рис. 3).

Замеренное по ним время перемещения составило 87 мс, что удовлетворяет требованиям по скорости и точности позиционирования.

## Выводы

Разработанная ранее нелинейная математическая модель ЭМП [6-8] в алгебраических и дифференциальных уравнениях с постоянными коэффициентами учитывает, помимо особенностей конструкции, также и инерционность подвижных частей самого привода, и присоединённой к нему массы отсечного золотника (рис. 4).

Первичное моделирование в ней режима форсированного перемещения штока ЭМП на рабочий ход 21 мм показывает качественную сходимость с результатами испытаний (рис. 5) на наиболее ответственном режиме. Для сравнения также приведён график «идеального» перемещения ЭМП на ход 20 мм без учёта инерционности подвижных узлов.

Указанная модель, по-видимому, может быть использована как базовая при проектировании или выборе типоразмера ЭМП под заданные условия эксплуатации, но подлежит дальнейшей проверке на прочих режимах, а также уточнению параметров её нелинейных элементов и их влияния на параметры переходного процесса.

## Список литературы

1. Дунаев В.И., Федосовский М.Е., Кушбасов А.Н. Способ повышения точности измерения аналогового сигнала, устройство для измерения аналогового сигнала // Патент РФ RU 2506697.

2. Жеваженко В.В., Смирнов И.И., Сизов А.Н., Кирюхин А.А. Модернизация системы автоматического регулирования частоты вращения и давления пара паротурбинной установки. Материалы XIII молодёжной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2015». СПб – ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2015. – С. 104–106.

3. Кирюхин В.И., Тараненко Н.М., Огурцова Е.П. Паровые турбины малой мощности КТЗ. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.

4. Программы и методики предварительных испытаний ЭМП: рег. № А17/30-632, № А2/30-741. ЗАО «Диаконт», 2011 г.

5. Пупкова К.А., Егупова Н.Д. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

6. Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Чубаров Ф.Л., Гусев И.В. Применение высокоточных быстродействующих следящих электромеханических приводов в электрогидравлических системах регулирования частоты вращения паровых турбин. Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции 30 ноября 2014 г.: в 6 ч. / Под общ. ред. М.Г. Петровой. – Белгород: ИП Петрова М.Г., 2014. – Часть III. – С. 133–139.

7. Сизов А.Н., Чубаров Ф.Л., Гусев И.В. Разработка модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1.; http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19719.

8. Сизов А.Н., Кириллов А.А., Кушбасов А.Н. Концепция разработки оборудования для блочной АТГУ и ПТУ. Анализ существующих схем регулирования и предложения по их модернизации. Материалы X молодёжной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2012». – СПб.: Изд-во ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2012.

## References

1. Dunaev V.I., Fedosovskij M.E., Kushbasov A.N. Sposob povyshenija tochnosti izmere-nija analogovogo signala, ustrojstvo dlja izmerenija analogovogo signala // Patent RF RU 2506697.

2. Zhevazhenko V.V., Smirnov I.I., Sizov A.N., Kirjuhin A.A. Modernizacija sistemy avtomaticheskogo regulirovanija chastoty vrashhenija i davlenija para paroturbinnoj ustanovki. Materialy XIII molodjozhnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Vzgljad v budushhee-2015». SPb OAO «CKB MT «Rubin», 2015. pp. 104–106.

3. Kirjuhin V.I., Taranenko N.M., Ogurcova E.P. Parovye turbiny maloj moshhnosti KTZ. M.: Jenergoatomizdat, 1987. 216 p.

4. Programmy i metodiki predvaritelnyh ispytanij JeMP: reg. no. A17/30-632, no. A2/30-741. ZAO «Diakont», 2011 g.

5. Pupkova K.A., Egupova N.D. Matrichnye metody rascheta i proektirovanija slozhnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija dlja inzhenerov M.: Izdatelstvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2007. 664 p.

6. Sizov A.N., Musatov E.A., Chubarov F.L., Gusev I.V. Primenenie vysokotochnyh bystrodejstvujushhih sledjashhih jelektromehanicheskih privodov v jelektrogidravlicheskih sistemah regulirovanija chastoty vrashhenija parovyh turbin. Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoj nauki: sbornik nauchnyh trudov po materialam V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 30 nojabrja 2014 g.: v 6 ch. / Pod obshh. red. M.G. Petrovoj. Belgorod: IP Petrova M.G., 2014. Chast III. pp. 133–139.

7. Sizov A.N., Chubarov F.L., Gusev I.V. Razrabotka modeli vysokotochnogo bystrodej-stvujushhego sledjashhego jelektromehanicheskogo privoda //Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2015. no. 1–1.; http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19719.

8. Sizov A.N., Kirillov A.A., Kushbasov A.N. Koncepcija razrabotki oborudovanija dlja blochnoj ATGU i PTU. Analiz sushhestvujushhih shem regulirovanija i predlozhenija po ih mo-dernizacii. Materialy H molodjozhnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Vzgljad v budushhee 2012». SPb.: Izd-vo OAO «CKB MT «Rubin», 2012.