

УДК 621.224:681.511

Канюк Г.И.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мезеря А.Ю.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мельников В.Е.

Украинская инженерно-педагогическая академия

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением необходимого качества электрической энергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях, повышением точности регулирования частоты и мощности гидроагрегатов. Выполнен параметрический синтез астатического регулятора системы автоматического регулирования частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. Проведен анализ существующего нормативно-методического обеспечения систем автоматического регулирования гидроагрегатов.

Ключевые слова: гидрогенератор, система автоматического регулирования, нормативное обеспечение.

Постановка проблемы. Электрическая энергия, которая производится гидроэлектростанциями, характеризуется рядом показателей качества, которые жестко регламентируются отечественными и зарубежными стандартами. Отклонение фактических показателей качества от регламентированных значений приводит к дополнительным потерям электроэнергии, снижению надежности и срока службы электрооборудования, а также к снижению эффективности или даже прямого нарушения технологических процессов потребителей.

Стабильность частоты электрического тока в электрической сети является одним из важнейших показателей качества электроэнергии. Этот показатель обеспечивается эффективностью работы систем автоматического регулирования частоты и мощности (далее – САР Ч и М) гидрогенераторных установок, а именно – показателями их статической и динамической точности, которые должны обеспечивать минимальное отклонение частоты вращения роторов гидрогенераторов от заданных режимных значений.

Повышение эффективности автоматического регулирования гидравлических турбин представ-

ляет собой важную и актуальную научно-техническую задачу, решение которой позволит повысить технико-экономические характеристики гидроагрегатов и обеспечить высокое качество электроэнергии, вырабатываемой гидравлическими электростанциями.

Постановка задания. Актуальным вопросом в современной энергетике является обеспечение необходимого качества электрической энергии. Основным показателем качества электрической энергии является отклонение частоты. Допуски на изменение частоты электроэнергии, вырабатываемой современными гидроагрегатами, а также на ее отклонение очень жесткие. По отечественным стандартам, максимально допустимые отклонения частоты для систем автоматического регулирования, оснащенных гидравлическими и электрогидравлическими регуляторами, находятся в пределах от 0,3 до 0,1%, в то время как по международным стандартам этот показатель не должен превышать 0,06% [1].

Отклонение частоты приводит к увеличению потерь активной мощности в электрических сетях и росту потребления активной и реактивной мощностей, недовыпуску промышленными предприятиями

продукции и увеличению дополнительного времени работы предприятия для выполнения задания. Известно, что снижение частоты на 1% увеличивает потери в электрических сетях на 2%. В связи с этим возникает вопрос поддержания частоты на необходимом уровне. За недопустимое отклонение частоты запускается механизм штрафных санкций [2].

Задача поддержания частоты в ее заданных значениях связана с различными факторами, такими как конструктивные особенности оборудования и система автоматического управления.

Особенно актуально эта задача стоит для ГЭС, так как станции этого типа работают в пиковой и полупиковой части графика электрических нагрузок, что подразумевает необходимость в частых переходных режимах.

В связи с тем, что в переходных режимах происходит отклонение частоты, возникает задача уменьшения длительности переходных процессов, при этом необходимо обеспечить качество электроэнергии на необходимом уровне, в частности удержать отклонение частоты в рамках допустимого диапазона, а это является непосредственной задачей САР Ч и М гидроагрегата.

Одной из особенностей энергетики Украины является наличие существенной неравномерности графиков электрических нагрузок [3]. В качестве примера на рис. 1. приведен характерный график электрических нагрузок для Украины.

Как видно из графиков, в энергосистеме Украины имеются значительные неравномерности не только суточных, но и годовых графиков нагрузок, большая часть – в пиковом и полупиковых режимах, которые берут на себя ГЭС и ГАЭС, обладающие высокой маневренностью и большим регулировочным диапазоном, высокими скоростями изменения нагрузок, минимальным временем набора нагрузки, пуска и остановки агрегатов.

При этом выполняются следующие задачи [5]:

- покрываются наиболее сложные пиковые и полупиковые части графика нагрузок. При этом ГЭС и ГАЭС при покрытии пиковой части графика нагрузки в среднем работают 2–5 часов в сутки, а полупиковой части графика – 5–15 часов в сутки;

- при работе в насосном режиме ГАЭС заполняет провальную часть графика нагрузок, снижая его неравномерность, и обеспечивает оптимиза-

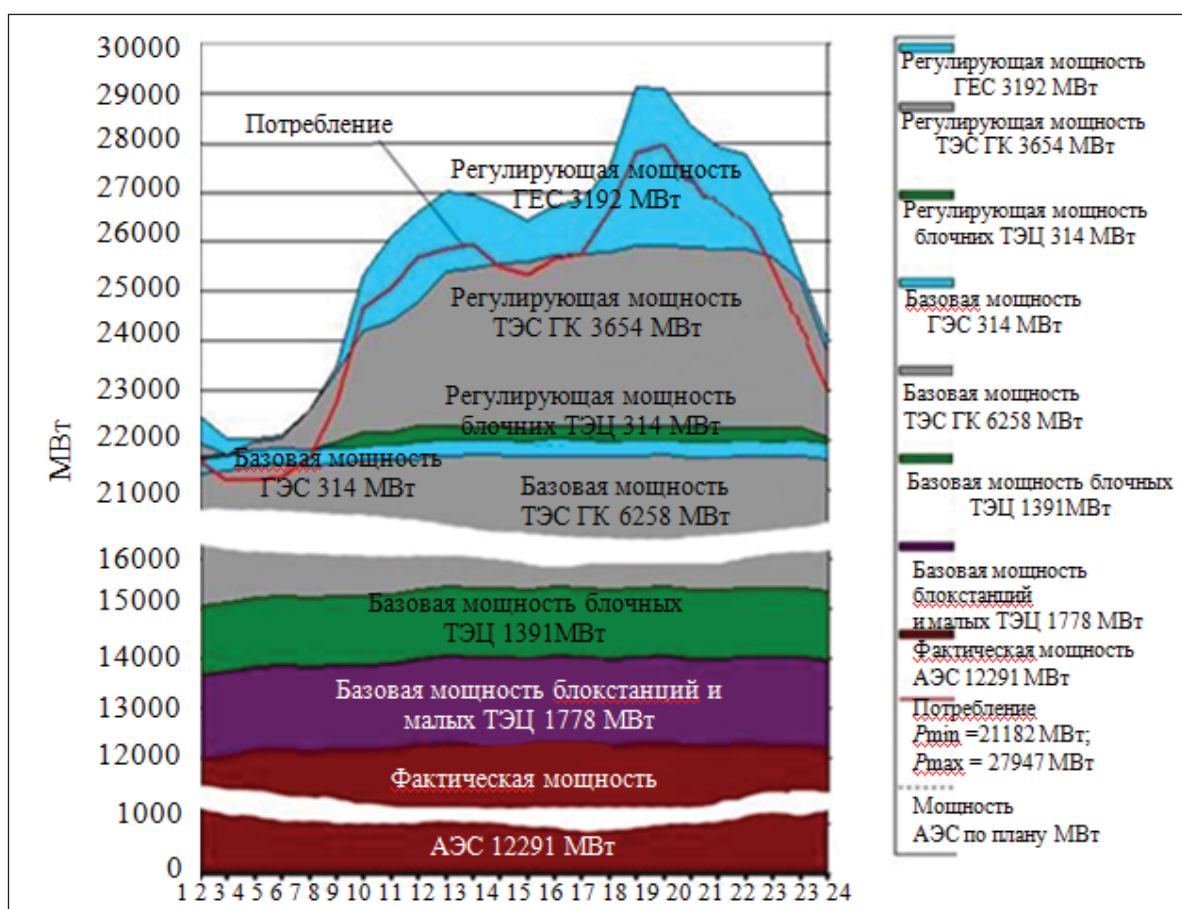


Рис. 1. Суточный график нагрузок в энергосистеме Украины

цию структуры генерирующих мощностей в энергосистеме за счет увеличения мощности базисных ТЭС и АЭС;

- выполняются функции аварийного и нагрузочного резервов энергосистемы;
- используются в качестве источников реактивной мощности.

Перечисленные выше задачи крайне необходимы для поддержания баланса мощностей в энергосистеме, особенно во время существенного дефицита и дороговизны энергетических ресурсов.

Так как ГЭС и ГАЭС лучше других электростанций приспособлены к быстрому изменению режимов работы, покрытию кратковременных пиков нагрузок, повышение точности регулирования частоты гидроагрегатов представляет собой важную и актуальную научно-техническую задачу [5; 6].

Анализ последних исследований и публикаций. Выполнена работа по разработке и внедрению системы автоматического регулирования гидротурбины, основанной на методе структурно-параметрического синтеза регулятора частоты и мощности гидротурбины на основе обратных задач динамики [7].

Теоретические исследования показали, что использование электронного регулятора, синте-

зированного на принципах обратных задач динамики, обеспечивает компенсацию всех видов статических и динамических ошибок электрогидравлического следящего привода (далее – ЭГСП) и их максимальное быстродействие, соответствующее предельному уровню энергетических возможностей системы. Так же было предложено использовать структуру астатического быстродействующего регулятора, построенного на принципах обратных задач динамики, объекта управления, для компенсации статических и динамических погрешностей системы регулирования.

Изложение основного материала исследования. *Параметрический синтез астатического регулятора системы автоматического регулирования частоты вращения гидротурбины на основе решения обратных задач динамики.* Параметрический синтез прецизионного регулятора осуществляется при помощи выбора стандартных характеристических полиномов, которые соответствовали следующему принятому функционалу оптимизации [8]:

$$I = \min \int |\varepsilon(t)| dt. \quad (1)$$

Выбор такого функционала обеспечивает приемлемый компромисс между статической и динамической точностью, при этом учитываются технологические ограничения: ограничения управляющего напряжения на входе (электроги-

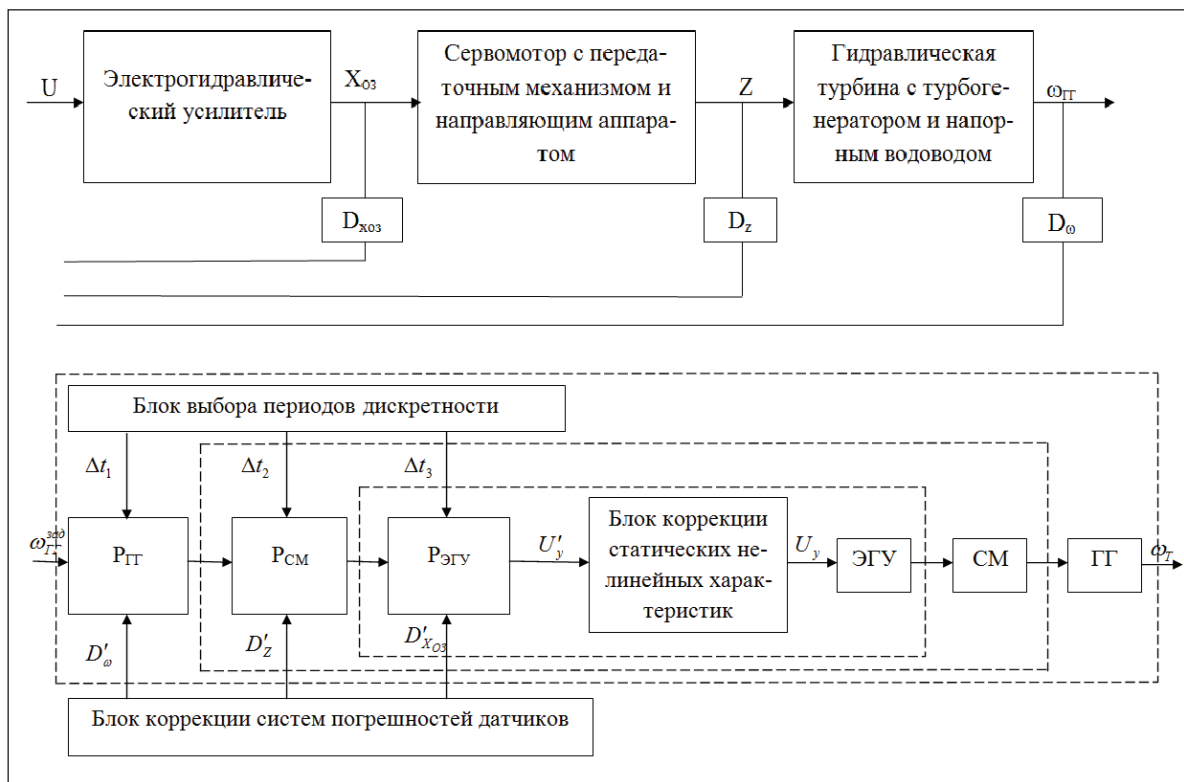


Рис. 2. Функциональная схема мультипликативного регулятора САР частоты вращения гидротурбины

гидравлический усилитель) и ограничения параметров электрогидравлического привода по давлению, расходу и потребляемой мощности.

При этом накладываются технологические ограничения:

– ограничение управляющего напряжения на входе в электрогидравлический усилитель:

$$|U_y| \leq U_{\max}; \quad (2)$$

– ограничение параметров электрогидравлического привода:

$$P \leq P_{\max}; Q \leq Q_{\max}; N \leq N_{\max}. \quad (3)$$

Желаемый характеристический полином:

$$(n = 8; k = 1; N = n + k = 9); D^*(s) = s^{2N} + \sum_{l=0}^{2N-1} d_l^* s^l = 0. \quad (4)$$

Матричное соотношение для определения оптимальных значений параметров регулятора:

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_{N-1} \\ r_0 \\ r_1 \\ \dots \\ r_{N-1} \end{bmatrix}_{2N \times 1} = \begin{bmatrix} a'_0 & 0 & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & 0 \\ a'_1 & a_0 & \dots & 0 & b_1 & b_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{N-1} & a'_{N-2} & \dots & a_0 & b_{N-1} & b_{N-2} & \dots & b_0 \\ a'_0 & a'_1 & \dots & a_1 & b_n & b_{n-1} & \dots & b_1 \\ 0 & a'_n & \dots & a_2 & 0 & b_n & \dots & b_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ a_{n-2} \\ \dots \\ a_0 \\ a_{n-1} - a'_0 \\ \dots \\ a_{n-1} - a'_{N-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Для практической реализации регулятора, упрощения настройки и отладки использовался принцип мультипликативного управления, в котором синтезируются регуляторы для каждого выделенного автономного контура (электрогидравлический усилитель, сервомотор, гидроагрегат). Функциональная схема мультипликативного регулятора САР частоты вращения гидротурбины изображена на рис. 2.

Поскольку выходы каждого контура подлежат непосредственному измерению при помощи датчиков перемещений и частоты вращения, то для каждого выделенного контура синтезирован отдельный регулятор меньшего порядка, а именно регуляторы первого и третьего порядка [8].

Векторно-матричное представление математических контуров управления:

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + B\vec{U}; \quad (6)$$

– Турбогенераторная установка с напорным водоводом:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} \omega_{гр} \\ Q \end{pmatrix}_{2 \times 1}; A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_{гр}} & \frac{K_{МП}^Q}{T_{гр}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{ВОД}} \end{pmatrix}_{2 \times 2}; \vec{U} = (NZ)_{2 \times 2}; B = \begin{pmatrix} -\frac{K_{МП}^N}{T_{гр}} & 0 \\ 0 & \frac{K_Z^Q}{T_{ВОД}} \end{pmatrix}_{2 \times 2}; \quad (7)$$

– Сервомотор:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_{см} \\ V_{см} \\ \Delta P \end{pmatrix}_{3 \times 1}; A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_{см}^{M^2}} & -\frac{2\xi_{см}}{T_{см}^M} & \frac{K_{\Delta P}^{X_{см}}}{T_{см}^{M^2}} \\ 0 & -\frac{K_{XP}}{T_{г}^{см}} & -\frac{1}{T_{г}^{см}} \end{pmatrix}_{3 \times 3};$$

$$\vec{U} = X_{ос3 \times 1}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{X_{ос}}^P \end{pmatrix}_{3 \times 1} \quad (8)$$

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_{ос} \\ V_{ос} \\ i \end{pmatrix}_{3 \times 1}; A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_{эгр}^{M^2}} & -\frac{2\xi_{эгр}}{T_{эгр}^M} & \frac{K_{X_{ос}}^i}{T_{эгр}^{M^2}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{эгр}^3} \end{pmatrix}_{3 \times 3}$$

$$\vec{U} = X_{ос3 \times 1}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{iu}}{T_{эгр}^3} \end{pmatrix}_{3 \times 1} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_{ос} &= V_{ос}; \\ \dot{V}_{ос} &= -\frac{1}{T_{эгр}^{M^2}} X_{ос} - \frac{2\xi_{эгр}}{T_{эгр}^M} V_{ос} + \frac{K_{X_{ос}}^i}{T_{эгр}^3} i \\ \dot{i} &= -\frac{1}{T_{эгр}^3} i + \frac{K_{iu}}{T_{эгр}^3} U; \end{aligned} \quad (11)$$

Структурно-параметрический синтез унифицированного мультипликативного регулятора частоты вращения гидротурбины:

– Схема регулятора третьего порядка. Астатические регуляторы контуров управления электрогидравлическим усилителем и сервомотором:

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 \\ 1 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 \\ 0 & 1 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{n0} \\ a_{n1} \\ a_{n2} \\ a_{n3} \\ a_{n4} \\ a_{n5} - a_0 \\ a_{n6} - a_1 \\ a_{n7} - a_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

– Схема регулятора второго порядка. Астатический регулятор контура управления частотой вращения гидротурбины:

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ 1 & a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 \\ 0 & 1 & a_1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_{H0} \\ a_{H1} \\ a_{H2} \\ a_{H3} \\ a_{H4} - a'_0 \\ a_{H5} - a'_1 \end{bmatrix} \quad ((13))$$

Реальные практические результаты в решении этой задачи можно получить, создав системную научно-техническую и нормативную базы, обеспечивающие создание и промышленное внедрение прецизионных САР Ч и М гидрогенераторных установок, которые способны поддержать заданную точность и стабильность частоты вырабатываемого электрического тока, а также установленную мощность энергоблоков [9].

Анализ существующего нормативно-методического обеспечения систем автоматического регулирования гидроагрегатов. Сегодня существует нормативно-техническая документация, касающаяся вопросов регулирования обратимых гидравлических машин. В ней освещены вопросы автоматического регулирования, поддержания частоты и мощности, настройки регуляторов, расчет технико-экономических показателей, а также методов и средств обеспечения.

В то же время западноевропейские энергосистемы (UCTE и др.) первичного и вторичного регулирования обеспечивают более высокое качество регулирования частоты. Согласно нормам UCTE, регулирование частоты нормируется величиной и временем готовности к использованию резервов, коэффициентом статизма и зоной нечувствительности систем автоматического регулирования агрегатов ГЭС [10; 11]:

– обеспечение первичного регулирования частоты в системе за счет регулировочного резерва мощности не менее 2,5% текущей нагрузки и его готовность к использованию от 5 до 30 с. Коэффициент статизма агрегатов для ГЭС – 2–6%;

– обеспечение вторичного регулирования частоты в объеме мощности наиболее крупного генерирующего блока (1 000 МВт) в течение нескольких минут (до 5 мин). К нему относятся изменения мощности включенных агрегатов, выполняемые оперативно персоналом либо воздействием АРЧМ.

Указанные требования значительно отличаются от требований, приведенных в Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Украины [11; 12], а также в ряде других основополагаю-

щих нормативных документов, касающихся вопросов регулирования гидравлических электростанций.

Приведение выделенной части электростанций к современным требованиям по первичному и вторичному регулированию требует значительных затрат на их модернизацию и может быть реализовано только за счет сочетания технических требований к регулированию частоты в условиях конкурентного рынка электроэнергии, методологии ценообразования на рынке регулирования частоты и организации рынка регулирующей мощности [13].

Общие технические требования определены только к тем управляющим подсистемам АСУ ТП ГЭС, по которым накоплен достаточно большой опыт их функционирования. Эти подсистемы реализованы на традиционных средствах и лишь в ограниченном количестве – на современных средствах вычислительной техники [14].

Применение современной вычислительной техники позволяет расширить функциональные возможности системы управления и выполнять функции, не характерные для аналоговых систем. Поэтому при разработке АСУ ТП представленные в этом документе требования могут быть дополнены с учетом потребностей конкретной ГЭС и возможностей используемой техники.

Выводы. Выполнен параметрический синтез прецизионного регулятора при помощи выбора стандартных характеристических полиномов. Использован принцип мультипликативного управления, в котором синтезируются регуляторы для каждого выделенного автономного отдельного контура.

На сегодняшний день в нормативно-технической и нормативно-методической документации не достаточно полно сформулированы универсальные нормативные методы структурно-параметрического синтеза прецизионных САР гидроагрегатов, которые гарантированно смогли бы обеспечить высокие показатели точности регулирования частоты вращения и мощности. В имеющейся документации по системам автоматического регулирования гидравлических турбин не достаточно полно сформулированы системные и количественные требования показателей, а также методы и средства их гарантированного технического обеспечения [15].

Для составления такой документации необходимо выполнить цикл теоретических и экспериментальных научных исследований, которые будут включать в себя математическое моделирование технологического процесса и оборудования, идентификацию математических моделей по результатам экспериментальных исследований, структурный и параметрический синтез прецизионных регуляторов.

Список литературы:

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 1999. 33 с.
2. Нормы качества электрической энергии. Электроэнергетика. URL: <http://forca.com.ua/info/spravka/normy-kachestva-elektricheskoi-energii.html>.
3. Маляренко В.А., Маляренко В.А., Колотило І.Д., Нечмоглод І.С. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи його вимірювання. Реалізації. Енергозбереження, енергетика, энергоаудит. 2011. № 5 (87). С. 19–22.
4. Плачков И.В., Дунаевская Н.И., Подгуренко В.С. Книга 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики. Киев. 2012. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-2/section-2/2>.
5. Музей гидроэнергетики УПИЦ. Углич. 2005. URL: http://www.hydrmuseum.ru/ru/encyclopedia/glossary/Grafik_nagruzki_obesp_srednesut_mosch.
6. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Мельников В.Е. Прецизионная система автоматического регулирования гидротурбины. Вестник НТУ «ХПИ» сб. науч. тр. Темат. вып. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Харьков. НТУ «ХПИ». 2015. № 17 (1126). С. 91–96.
7. Мельников В.Е. Параметрический синтез астатического регулятора САР частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. Материалы XXIII межд. науч. конф. (автоматика-2016). Сумы. 2016. С. 94–95.
8. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Мельников В.Е. Параметрический синтез астатического регулятора САР частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. НТУ «КПИ» Адаптивні системи автоматичного управління. Киев, 2018.
9. Шавлович З.А. Совершенствование конструкции и режимов работы гидравлических приводов в системах регулирования гидротурбин: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.13. Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург, 2004.
10. UCTE Operation Handbook. Policy 1: Load-Frequency Control and Performance. Final policy 2.2 E, 2004. URL: https://docuri.com/download/ucte-policy1-v22-load-frequency-control-and-performance_59c1e651f581710b286be8c8_pdf.
11. Бондаренко Ю.Н. Опыт внедрения наукоемких технологий в систему управления гидроэлектростанций с целью повышения их надежности и эффективности работы в ОЭС Украины. Корпорация «МАСТ-ИПРА». 2010. URL: <http://docplayer.ru/29672523-Modernizaciya-sistemy-kontrolya-i-upravleniya-energobloka-1-zuevskoy-tes-ooo-vostokenergo.html>.
12. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей. Правила. Отраслевой резервно-инвестиционный фонд развития энергетики. Издание первое. Львов. 2002. 323 с. URL: http://rza.org.ua/down/open/tehnicheskaya-ekspluatatsiya-elektricheskikh-stantsiy-i-setey-pravila_31.html.
13. О повышении качества первичного и вторичного регулирования частоты электрического тока в ЕЭС. Отраслевой резервно-инвестиционный фонд развития энергетики. Москва, 2002. 78 с. URL: <http://www.enersys.ru/wp-content/uploads/2009/09/prikaz.doc>.
14. РД 153-34.0-35.519-98. Общие технические требования к управляющим подсистемам агрегатного и стационарного уровней АСУ ТП ГЭС. Москва, 1999. 14 с.
15. Канюк Г.І. Прецизійні системи автоматичного регулювання турбогенераторних установок. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2014. № 11. С. 12–27.

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

У статті розглянуті питання, пов'язані із забезпеченням необхідної якості електричної енергії, що виробляється на гідроелектростанціях, підвищенням точності регулювання частоти і потужності гідроагрегатів. Виконано параметричний синтез астатичного регулятора системи автоматичного регулювання частоти обертання гідротурбіни на основі розв'язання обернених задач динаміки. Проведено аналіз наявного нормативно-методичного забезпечення систем автоматичного регулювання гідроагрегатів.

Ключові слова: гідрогенератор, система автоматичного регулювання, нормативне забезпечення.

**SCIENTIFIC SUBSTANTIATION AND NORMATIVE SUPPORT
OF ENERGY EFFICIENT OPERATING MODES OF AUTOMATIC
REGULATION SYSTEMS OF HYDROGENERATOR UNITS**

The article deals with issues related to ensuring the required quality of electric energy produced by hydroelectric power stations, increasing the accuracy of frequency and power control of hydraulic units. A parametric synthesis of the astatic regulator of the system for automatic control of the speed of a hydroturbine is performed on the basis of solving the inverse problem of dynamics. The analysis of the existing normative and methodical support of automatic control systems for hydraulic units is carried out.

Key words: hydrogenerator, automatic control system, regulatory support.