

УДК 338.45:621311:621.14 (476)

Методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла

А. Н. Кухоренко¹⁾

¹⁾ Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Максимальное распространение в энергетике Республики Беларусь и странах СНГ получили трехимпульсная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, а также ее модификации, которые имеют следующие недостатки: наличие статических ошибок регулирования в конце переходного процесса при отработке внутренних возмущений и возмущений расходом перегретого пара; большие отклонения уровня при резких и значительных изменениях нагрузки, что зачастую приводит к разгрузке или останову котла или энергоблока. Для устранения указанных недостатков ранее были разработаны инвариантные системы автоматического регулирования питания барабанного котла. Первый вариант инвариантной системы автоматического регулирования с выделением эквивалентного внешнего возмущения отличается от типовой тем, что структуру стабилизирующего регулятора выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора, а структуру и параметры динамической настройки корректирующего устройства с учетом эквивалентного объекта регулирования, включающего внутренний контур стабилизирующего регулятора. Во втором варианте предложена передаточная функция устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, представленная в виде последовательно соединенных типовых звеньев: реального дифференциатора и звена быстрого реагирования. Для уменьшения максимальной величины регулирующего воздействия в этой схеме на выходе устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения дополнительно установлен ограничитель. Инвариантные системы автоматического регулирования устраняют статические ошибки регулирования при всех воздействиях и позволяют существенно улучшить качество поддержания уровня при переменных режимах. Для оценки экономической эффективности внедрения инновационной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане как системы предложена методика, которая позволяет рассчитать основные составляющие экономического эффекта от ее внедрения: повышение надежности (безотказности) работы котла; увеличение экономичности котла за счет существенного уменьшения времени отработки воздействий по сравнению с типовой системой автоматического регулирования и долговечности ее работы.

Ключевые слова: инвариантная система автоматического регулирования, барабан котла, уровень воды, экономическая эффективность внедрения

Для цитирования: Кухоренко, А. Н. Методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / А. Н. Кухоренко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 62–73

Адрес для переписки

Кухоренко Александр Николаевич
Научно-исследовательский институт
пожарной безопасности и проблем чрезвычайных
ситуаций МЧС Республики Беларусь
ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 299-96-40
ank-17@ya.ru

Address for correspondence

Kuchorenko Alexsander N.
Research Institute of Fire Safety and Emergency
Situations Problems of the Ministry of Emergency
Situations of the Republic of Belarus
Soltys str., 183a,
220046, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 299-96-40
ank-17@ya.ru

Economic Efficiency Calculation Procedure for the Automatic Water-Level Regulating Invariant System in the Boiler Shell

A. N. Kuchorenko¹⁾

¹⁾Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations Problems of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The three-element system for automatic water-level regulation in the boiler shell as well as its modifications received maximal dissimulation in the Republic of Belarus and the CIS countries power economies. Though, they possess the following shortages: occurrence of the steady-state errors at the end of the transient process during the control response to internal disturbances and those by over-heated steam; large level deviations at sharp and significant load changes, which often leads to the boiler or the power block deloading or stoppage. As a remedial action against the mentioned disadvantages, the invariant systems for the drum boiler automatic feed regulation were developed earlier. The first variant of the automatic regulation invariant system with the equivalent external disturbance individualization differs from the typical one in the way that they select the stabilizing controller arrangement on the basis of transmission response of the optimal controller. And the compensating device dynamic settings structure and parameters are chosen with respect to the equivalent controlled member including the stabilizing controller inner contour. The second variant offers the compensating device transmission response to the equivalent external disturbance represented as series-connected typical sections: a real differentiator and a quick-response unit. For the control action maximum value reducing in this scheme, there is a suppressing device additionally installed at the exit of the equivalent external disturbance compensation device. The automatic regulation invariant systems eliminate steady-state errors at all impacts and allow improving significantly the level control quality at variable conditions. For economic efficiency evaluation of the boiler-shell water level automatic regulation innovative system implementation as a system, the author proposes a technique allowing calculating the main components of the economic effect of its implementation. Inter alia, increasing reliability (faultlessness) of the boiler operation, increment in the boiler efficiency at the expense of essential action-execution time decrease as compared with the typical automatic regulation system and longevity of its operation.

Keywords: automatic regulation invariant system, boiler shell, water level, economic efficiency of implementation

For citation: Kuchorenko A. N. Economic Efficiency Calculation Procedure for the Automatic Water-Level Regulating Invariant System in the Boiler Shell. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 62–73 (in Russian)

Основная задача энергетики – надежное снабжение промышленности и населения электрической и тепловой энергией. При этом главной опасностью, связанной с надежностью, является старение тепловых электростанций (ТЭС). Поэтому важное направление реализации Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси – модернизация основных производственных фондов, включающая не только модернизацию (реконструкцию) котлов и турбин, соответствующего вспомогательного оборудования, но и контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) с одновременным продлением срока службы существующих ТЭС с 30–40 до 50–60 лет [1].

Способность автоматизированного теплоэнергетического оборудования выполнять свои функции обычно выражают понятиями «надежность»

(«безотказность») и «долговечность» («срок службы») как технологического оборудования, так и самих технических средств автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). При этом надежность характеризуется средним числом остановов, например котла, в единицу времени, произошедших в первую очередь из-за внезапных отказов, причиной которых является наличие ослабленных элементов металла (из-за дефектов металла, коррозии, неправильной эксплуатации), исчерпавших свой ресурс значительно раньше нормативного срока. После таких остановов поврежденный элемент заменяется, и работоспособность восстанавливается. Экономический эффект от модернизации системы автоматического регулирования (САР) уровня воды в барабане котла определяют, прежде всего, уменьшением ущерба, наносимого отказами и авариями, благодаря повышению надежности основного оборудования. Вместе с тем авария на одной ТЭС нарушает нормальную работу всей энергосистемы. Повышение качества регулирования снижает число отказов и аварий, увеличивает коэффициент готовности основного оборудования, позволяет уменьшить резерв установленной мощности в системе, уменьшает число аварий, обусловленных перепиткой котла и упуском уровня, а также частично предотвращает повреждения котла и турбины.

Долговечность характеризуется сроком службы элементов котла до их полной замены, вызванной исчерпанием ресурса службы у основной массы металла из-за накопления необратимых процессов разрушения. Так как замена некоторых участков (элементов) котла новыми при ликвидации внезапных отказов относится лишь к малой доли всего металла, то срок службы металла до замены не связан со средним числом внезапных отказов. Это позволяет проводить анализ надежности и долговечности отдельно.

Кроме отказов технологического оборудования ТЭС, учитывают также отказы технических средств АСУ ТП, например элементов САР, качество работы которых оказывает наибольшее влияние на экономичность, надежность и долговечность работы технологического оборудования ТЭС. При этом в замкнутый контур САР котел входит как основной ее элемент. Необходимо отметить, что при анализе внезапных отказов почти всегда удается установить причину отказа и отказавшее устройство. Вместе с тем при анализе безотказности САР учитывают также постепенные отказы, влияющие как на надежность, так и на долговечность котла. Устранение постепенных отказов производят путем изменения параметров настройки САР с помощью специально предназначенных для этого органов и рассматривают последние как отказы САР в целом. Как показали проведенные исследования, для аналоговых САР постепенных отказов больше (59 %), чем внезапных (41 %) [2].

Переход на более надежные микропроцессорные средства автоматики уменьшает число внезапных отказов САР до 38 %. Чрезвычайно жесткие требования предъявляются к качеству регулирования современных барабанных котлов. При этом зона работы САР питания обычно ограничена

пределами уставок защит от понижения уровня воды в барабане котла и открытия аварийного слива. Эти пределы определяют безопасность работы котла, превышение их вызывает аварийную ситуацию. Превышение верхнего аварийного предела может привести к забросу воды в пароперегреватель, резкому снижению температуры острого пара, гидравлическому и тепловому ударам и повреждению турбины. Падение уровня за нижний аварийный предел может повлечь нарушение циркуляции в экранных трубах и их пережог. Изменение уровня воды в барабане котла в допустимых пределах практически не оказывает влияния на работу котла. Долговечность металла барабана и водяного экономайзера, а также потребление электрической энергии питательными насосами зависят от качества регулирования расхода питательной воды. Резкие колебания расхода последней способствуют появлению усталостных явлений в металле барабана, снижая его надежность. Поэтому отклонения между производством пара и подачей питательной воды должны быть минимальными. Улучшение качества поддержания уровня воды в барабане котла в типовой трехимпульсной САР и ее модификациях при изменении нагрузки обычно достигается за счет резких глубоких изменений расхода питательной воды, что неприемлемо из-за усталостных напряжений в металле. Поэтому САР питания барабанного котла должны обеспечить удержание уровня воды в допустимых пределах:

- при стационарном режиме (при отсутствии резких возмущений по нагрузке) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 20 мм;
- при скачкообразном возмущении по нагрузке на 10 % (исходная нагрузка – номинальная) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 50 мм;
- при нормальном стационарном режиме работы котла число включений регулятора не должно превышать шести в минуту.

У современных котлов с высоким тепловым напряжением колебания уровня при резких и значительных изменениях нагрузки достигают существенного значения. Так, для котла ТМГ-94 сброс нагрузки на 40 % приводит к изменению уровня до 120 мм даже при максимальном регулирующем воздействии расходом питательной воды, произведенным с целью удержания уровня на заданном значении. Например, в Белорусской энергосистеме в 2013 г. произошли три подобных отказа (на Новополоцкой ТЭЦ – 02.10.2013, Светлогорской ТЭЦ – 05.10.2013 и Гродненской ТЭЦ-2 – 19.01.2013). Причиной останова котлов на указанных ТЭЦ при резких колебаниях нагрузки явилось «набухание» уровня в барабане котла при быстром снижении давления в главном паропроводе почти в два раза.

При глубоких внутренних и внешних возмущениях типовые регуляторы питания атомных электростанций (АЭС) не в состоянии обеспечить поддержание уровня воды в пределах границ нормальной эксплуатации, что приводит к разгрузке или полному останову энергоблока и появлению экономических убытков, а также к снижению надежности парогенератора.

Автоматический регулятор уровня воды парогенератора АЭС поддерживает завышенный уровень воды на рабочих нагрузках, что приводит к увеличению влажности пара и повышенному износу лопаточного аппарата турбины. Это снижает надежность и срок службы турбины.

Вместе с тем замена старых технических средств САР теплоэнергетических процессов на современные микропроцессорные с использованием типовых алгоритмов регулирования и традиционных структурных схем не позволяет существенно улучшить качество поддержания теплоэнергетических параметров ТЭС, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок. В связи с этим актуальными становятся задачи модернизации САР ТЭС на базе инновационных методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем, существенно влияющих на экономичность, надежность и долговечность работы ТЭС [3], и разработки методики расчета экономической эффективности их внедрения. В первую очередь это касается САР уровня воды в барабане котла, так как последние относят к первой группе наиболее сложных и ответственных САР, показатели безотказности и ремонтпригодности которых приведены в [2].

В настоящее время максимальное распространение в энергетике Республики Беларусь и странах СНГ получили трехимпульсная САР уровня воды в барабане котла, а также ее модификации (каскадная САР, САР с дифференцированием сигнала по разности расходов перегретого пара и питательной воды), которые имеют следующие недостатки: наличие трех датчиков (уровнемер, паромер и водомер); статические ошибки регулирования в конце переходного процесса при отработке внутренних возмущений и возмущений расходом перегретого пара; «набухание» уровня в барабане котла при изменении расхода перегретого пара; глубокие отклонения уровня воды в барабане из-за больших колебаний при резком сбросе паровой нагрузки.

Для устранения указанных недостатков разработаны инвариантные САР питания барабанного котла [4, 5]. Инвариантная система с выделением эквивалентного внешнего возмущения отличается от типовой тем, что структуру стабилизирующего регулятора выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора, структуру и параметры динамической настройки корректирующего устройства – на базе передаточной функции оптимального регулятора с учетом динамики эквивалентного объекта регулирования, включающего внутренний контур стабилизирующего регулятора [4, 6–8].

В [5] предложено устройство компенсации эквивалентного внешнего возмущения, передаточная функция которого представлена в виде последовательно соединенных типовых звеньев: реального дифференциатора и звена быстрого реагирования. Кроме того, в этой системе имеется один параметр динамической настройки, численное значение которого выбирают с использованием диаграммы Вышнеградского в точке, где система обеспечивает максимальное быстроедействие при отработке задания без

перерегулирования. Для уменьшения максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды в этой схеме на выходе устройства компенсации дополнительно установлен ограничитель. Однако при этом качество регулирования уровня воды в барабане котла существенно улучшается по сравнению с типовой САР питания и ее модификациями. При повышении качества регулирования с использованием инвариантной САР снижается не только уровень колебаний питательной воды в барабане котла, но и расход питательной воды, устраняются статические ошибки регулирования в конце переходных процессов, длительность которых существенно уменьшается. Это благоприятно влияет на работу жаропрочных сталей. Использование методов структурно-параметрической оптимизации САР позволяет влиять на скорость изменения уровня воды в барабане котла, а следовательно, и температуру металла систем барабана. Это уменьшает перепады температуры и скорость ее изменения в барабане, а также способствует предотвращению усталостных повреждений за счет уменьшения концентрации напряжений трубных отверстий и в других местах. Номинальные напряжения, вызванные в кромках отверстий барабана, зависят как от внутреннего давления в барабане, его внутреннего диаметра, толщины стенки, так и обусловлены разностью температур верхней и нижней образующих барабана с учетом характера распределения температуры по периметру поперечного сечения барабана, который зависит от положения уровня воды в барабане, интенсивности теплоотдачи от воды к стенке и т. д.

Для принятия решения о модернизации САР уровня воды в барабане конкретного котла на базе современных методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем или обоснования раздела Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси необходимо провести оценку «эффект – затраты» выбранных альтернатив, т. е. найти оптимальное соотношение «выход – вход» с использованием предлагаемой методики. Здесь в качестве «входа» принимают величину инвестиций (капитальных и текущих затрат), а «выхода» – годовой экономический эффект от внедрения. Оценка требуемых инвестиций на модернизацию САР питания конкретного барабанного котла ТЭС или парогенератора АЭС целесообразно проводить по методике, приведенной в [9].

Капитальные затраты на обоснование дополнительного раздела Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси (объем внедрения инвариантных САР уровня воды в барабане – 234 котла) рассчитывают по методике, учитывающей стоимость 1 кВт установленной мощности, вид топлива, вероятностный фактор износа, фактор уровня необходимых усилий для продления срока службы котла, дополнительные затраты на проектирование, монтаж и наладку, а также долю затрат на САР уровня воды в барабане котла в общих затратах на КИПиА котла [1]

$$\text{ПКЗ} = \gamma_1 \left[K_{\text{уд}} N_{\text{уст}} \gamma_2 \Phi \text{И} \cdot \Phi \text{У} \right], \quad (1)$$

где ПКЗ – прямые капитальные затраты на модернизацию САР уровня воды в барабане котла; γ_1 – доля капитальных затрат САР питания в общих

затратах на модернизацию КИПиА котла; γ_2 – доля капитальных затрат САР на КИПиА котлов в зависимости от вида топлива (для угольных котлов – 0,0101; для жидких – 0,0107; для газовых – 0,0164); $K_{уд}$ – удельные капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности; $N_{уст}$ – установленная мощность котла; $\Phi И$ – показатель вероятностного фактора износа для КИПиА (0,9 – для всех видов топлива); $\Phi У$ – показатель фактора уровня усилий для КИПиА (0,33 – для всех видов топлива).

С учетом составляющих годового экономического эффекта $\mathcal{E}_г$ от модернизации САР технологических процессов ТЭС, приведенных в [9], применительно к регуляторам питания, работающим в составе энергоблоков барабанных котлов, необходимо учесть следующие факторы, обусловленные показателями экономичности и надежности работы основного оборудования ТЭС и АЭС:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_г = & \Delta Z_{сн} + \Delta Z_{нед} + \Delta Z_{рез} + \Delta Z_{эк} + \Delta Z_{рем} + \Delta Z_{вм} + \Delta Z_{нто}^o + \\ & + \Delta Z_{нто}^c + \Delta Z_{на}^o + \Delta Z_{на}^c + \Delta Z_{тр} + \Delta Z_a^A + \Delta Z_a^{то} + \Delta K_{сл}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_г$ – годовой экономический эффект от внедрения инвариантной САР; $\Delta Z_{сн}$ – экономия энергии на собственные нужды регулятора питания; $\Delta Z_{нед}$ – экономия за счет уменьшения величины ущерба от недоотпуска энергии потребителям; $\Delta Z_{рез}$ – изменение затрат, обусловленных наличием резервной мощности в энергосистеме; $\Delta Z_{эк}$ – то же затрат покрытия дефицита энергии резервной электростанцией в связи с вынужденным простоем более экономичного блока; $\Delta Z_{рем}$ – то же на вынужденные ремонты и пуски; $\Delta Z_{вм}$ – изменение расхода вспомогательных материалов; $\Delta Z_{нто}^o$ – экономия за счет повышения уровня надежности технологического оборудования, отказ которого ведет к останову оборудования; $\Delta Z_{нто}^c$ – то же надежности технологического оборудования, отказ которого ведет к снижению нагрузки котла (частичные отказы); $\Delta Z_{на}^o$ – экономия от изменения надежности аппаратуры регулирования, отказ которой приводит к останову котла; $\Delta Z_{на}^c$ – то же, отказ которой приводит к снижению нагрузки котла; $\Delta Z_{тр}$ – экономия от изменения трудозатрат на обслуживание технологического оборудования и аппаратуры автоматики; ΔZ_a^A – то же затрат на амортизационные отчисления и текущие ремонты аппаратуры автоматики; $\Delta Z_a^{то}$ – то же затрат на амортизационные отчисления и текущие ремонты технологического оборудования; $\Delta K_{сл}$ – экономия затрат от изменения срока службы элемента, узла или агрегата.

В качестве базы для сравнения вариантов предлагается использовать показатели, характеризующие экономичность и надежность типовой САР уровня воды в барабане котла или ее модификаций (средняя наработка на отказ или показатель интенсивности отказов, обратный средней наработке на отказ; среднее время восстановления и эквивалентный коэффициент вынужденных отказов), т. е. системы, состоящей из технических средств САР и котла в качестве объекта регулирования с учетом показателей качества регулирования уровня воды при основных воздействиях (полное время регулирования, максимальная величина перерегулирования, максимальная динамическая ошибка регулирования, максимальная величина регулирующего воздействия при изменении нагрузки котла).

На качество регулирования уровня воды в барабане котла влияют многие факторы, в том числе изменение расхода питательной воды, нагрузки потребителя, расхода топлива, температуры питательной воды и др. Но при этом наибольшее влияние на качество регулирования уровня воды в барабане котла оказывают структурная схема и параметры оптимальной динамической настройки регулятора питания. Численные значения указанных показателей качества регулирования получают путем моделирования переходных процессов типовых (базовых) САР при основных воздействиях (скачок задания, внутреннее возмущение, возмущение расходом перегретого пара с явлением «набухания» уровня), после чего сравнивают с аналогичными показателями модернизированных (инвариантных) САР уровня воды в барабане котлов, которые значительно лучше за счет изменения структурной схемы САР и выбора оптимальных параметров динамической настройки.

Сравнительный анализ результатов моделирования типовых САР уровня воды в барабане котла с предлагаемыми инвариантными системами показал, что полное время отработки возмущающих воздействий уменьшается в среднем более чем в три раза; максимальная динамическая ошибка регулирования уровня воды в барабане котла при скачкообразном изменении нагрузки котла уменьшается более чем в пять раз; полностью устраняются статические ошибки регулирования [4, 5]. При этом максимальная величина регулирующего воздействия меньше типовой САР на 15 %.

Интенсивность отказов λ_c собственно котла и технических средств реализации инвариантной САР уровня воды в барабане котла для базового и модернизированного вариантов определяют как сумму интенсивностей отказов каждого компонента системы [1]

$$\lambda_c = \lambda_{ка} + \lambda_{тс} = \frac{1}{T_0^{ка}} + \frac{1}{T_0^{тс}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{ка}$ – интенсивность отказов котла; $\lambda_{тс}$ – интенсивность отказов технических средств САР; $T_0^{ка}$ – наработка на отказ котлов белорусских

электростанций в период 1994–1996 гг. составила 3533–4180 ч [10] (среднее значение 3857 ч; с учетом процента износа котлов белорусских электростанций в настоящее время максимальная наработка на отказ увеличилась до 4820 ч); $T_0^{\text{тс}}$ – средняя наработка на отказ технических средств типового регулятора питания барабанного котла по данным, приведенным в [2], с учетом постепенных отказов находится в пределах 755–865 ч (среднее значение 810 ч).

При этом среднее время восстановления котла составило $T_{\text{в}}^{\text{ка}} = 55$ ч [10], а технических средств САР $T_{\text{в}}^{\text{тс}} = 1$ ч [2].

С учетом трехкратного повышения быстродействия инвариантной САР при отработке основных воздействий среднее время наработки на отказ технических средств

$$T_0^{\text{тс ИСАР}} = \frac{755 + 865}{2} \cdot 3 = 2430 \text{ ч.} \quad (4)$$

С учетом средней наработки котлов на отказ по формуле (3) определяли значение интенсивности отказов систем в целом:

$$\lambda_{\text{трп}} = \frac{1}{T_0^{\text{тс трп}}} + \frac{1}{T_0^{\text{ка}}} = \frac{1}{810} + \frac{1}{3857} = 0,00149; \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{ИСАР}} = \frac{1}{T_0^{\text{тс ИСАР}}} + \frac{1}{T_0^{\text{ка}}} = \frac{1}{2430} + \frac{1}{4820} = 0,000619, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{трп}}$, $\lambda_{\text{ИСАР}}$ – интенсивность отказов типового регулятора питания и инвариантной САР соответственно.

С учетом (5) и (6) значение наработки на отказ в целом составит:

- для типовой САР

$$T_0^{\text{трп}} = \frac{1}{\lambda_{\text{трп}}} = 671 \text{ ч;} \quad (7)$$

- для инвариантной САР

$$T_0^{\text{ИСАР}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ИСАР}}} = 1616 \text{ ч.} \quad (8)$$

Общее количество отказов типовой САР с учетом числа часов использования установленной мощности составит $n_{\text{с}}^{\text{н баз}} = 8,2$, а инвариантной – $n_{\text{с}}^{\text{н ИСАР}} = 3,4$. Время наработки на отказ инвариантной САР уменьшается по сравнению с типовой в 2,4 раза, а количество отказов сокращается на 58,7 %. При этом с использованием соответствующих формул [1, 10]

эквивалентный коэффициент готовности системы составит $K_{\text{э.гот}}^{\text{трп}} = 0,8473$, а инвариантной САР – $K_{\text{э.гот}}^{\text{ИСАР}} = 0,8867$. Таким образом, после модернизации эквивалентный коэффициент готовности инвариантной САР увеличится на 4,7 %. Это будет способствовать повышению надежности отпуска энергии в энергосистеме до $H = 0,996$ (норматив надежности в виде вероятности обеспечения покрытия электрической нагрузки потребителей для стран СНГ), т. е. до значений стран с развитой рыночной экономикой, например в Италии ($H = 0,995$) [10].

Экономию от расхода уменьшения электроэнергии на собственные нужды регулятора питания определяли по формуле

$$\Delta Z_{\text{уд}} = \Delta W_{\text{сн}} S_{\text{тз}}, \quad (9)$$

где

$$\Delta W_{\text{сн}} = \Delta W_{\text{сн}}^{\text{то}} + \Delta W_{\text{сн}}^{\text{САР}}; \quad (10)$$

$\Delta W_{\text{сн}}^{\text{то}}$, $\Delta W_{\text{сн}}^{\text{САР}}$ – соответственно изменение среднегодового расхода электроэнергии на собственные нужды регулятора питания; $\Delta W_{\text{сн}}$ – изменение среднегодового расхода электроэнергии на собственные нужды котла; $S_{\text{тз}}$ – топливная составляющая себестоимости электроэнергии.

Составляющая экономического эффекта $S_{\text{тз}}$ инвариантной САР уровня воды в барабане котла обусловлена сокращением числа включений электродвигателей привода питательного насоса и регулирующего питательного клапана (РПК) вследствие уменьшения времени отработки основных воздействий, снижая расход электроэнергии на собственные нужды котла. Кроме того, при внедрении инвариантной САР целесообразно использовать РПК с саморазгрузкой (в настоящее время на ТЭС ГПО «Белэнерго» такими клапанами оснащена только треть барабанных котлов), что позволяет существенно уменьшить установленную мощность электродвигателей РПК.

С учетом полученных данных по показателям надежности сравниваемых САР рассчитывают другие составляющие годового экономического эффекта, используя известные формулы в [1, 2, 9, 10].

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, отличающаяся учетом не только внезапных, но и постепенных отказов, а также качественных показателей регулирования уровня воды типовой (базовой) и инвариантной (новой) систем автоматического регулирования при основных воздействиях.

2. Методика позволяет обосновать экономическую целесообразность модернизации типовой системы автоматического регулирования уровня

воды конкретного котла или всех основных барабанных котлов ГПО «Белэнерго».

3. Приведенные расчеты показали, что внедрение инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла позволит увеличить время наработки на отказ системы (технические средства автоматизации котла) в 2,4 раза, уменьшить число отказов на 58,7 % и повысить эквивалентный коэффициент готовности системы автоматического регулирования котла на 4,7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борушко, А. П. Надежность и эффективность электростанций (методы и практика) / А. П. Борушко, Н. Б. Карницкий, Г. А. Борушко. Минск: БНТУ, 2007. 182 с.
2. Исследование безотказности и стабильности систем автоматического регулирования / М. А. Ястребенецкий [и др.] // Теплоэнергетика. 1970. № 3. С. 20–24.
3. Кулаков, Г. Т. Состояние, проблемы и перспективы внедрения информационных технологий и базисных инноваций в области автоматизации тепловых и атомных электростанций Республики Беларусь / Г. Т. Кулаков // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Алушта: Творческий союз научных и инженерных объединений (обществ) Крыма, 2012. С. 252–254.
4. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 2. С. 35–47.
5. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования питания барабанного парового котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 59–68.
6. Влияние автоматического регулирования на надежность парогенераторов / А. С. Корецкий [и др.] // Теплоэнергетика. 1973. № 10. С. 46–50.
7. Попырин, Л. С. Методы обоснования надежности тепловых электростанций / Л. С. Попырин // Вестник электроэнергетики. 1997. № 1. С. 28–39.
8. Критерии надежности, используемые при планировании генерирующей мощности / Ю. Н. Балаков [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Иркутск, 1997. Вып. 49, Т. 1: Надежность систем энергетики: экономические и информационные аспекты. С. 49–56.
9. Кулаков, Г. Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС. Ч. 1, 2 / Г. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, Ю. В. Макоско // Наука и техника. 2012. № 5. С. 92–97; 2013. № 2. С. 77–82.
10. Карницкий, Н. Б. Синтез надежности и экономичности теплоэнергетического оборудования ТЭС / Н. Б. Карницкий. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 227 с.

Поступила 24.06.2015 Подписана в печать 26.08.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Borushko A. P., Karnitskiy N. B., & Borushko G. A. (2007) *Power Station Reliability and Efficiency (Methods and Practice)*. Minsk: BNTU. 182 p. (in Russian).
2. Yastrebenetskiy M. A., Vasilevskiy R. G., Goldrin V. M., & Sobolev Ju. Ja. (1970) Investigation into Reliability and Stability of the Automatic Control Systems. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 3, 20–24 (in Russian).
3. Kulakov G. T. (2012) Status, Challenges and Perspectives of Implementing Information Technology and the Basis Innovations in the Area of Automation of the Thermal and Nuclear Po-

- wer Plants of the Republic of Belarus. *Challenges and Perspectives of Innovative Development of the Economy. Proceedings of XVII International Scientific-Practical Conference*. Alushta, Creative Union of scientific and Engineering Associations of the Crimea, 252–254 (in Russian).
4. Kulakov G. T., & Kuchorenko A. N. (2015) Invariant System of Automatic Water-Level Regulating in the Boiler Shell. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG*. [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 2, 35–47 (in Russian).
 5. Kulakov G. T., & Kuchorenko A. N. (2015) Invariant System of the Steam-Drum Boiler Feed Automatic Regulation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 5, 59–68 (in Russian)
 6. Koretskiy A. S., Oster-Miller Iu. R., Rinkus E. K., Foteeva L. V., & Khaberev N. N. (1973) Impact of the Automatic Regulation on Reliability of the Steam Generators. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 10, 46–50 (in Russian).
 7. Popyrin L. S. (1997) Thermal Power Plants Reliability Validation Methods. *Vestnik Elektroenergetiki* [Herald of Electric Power Industry], 1, 28–39 (in Russian).
 8. Balakov Yu. N., Lavrentev V. M., Neklepaev B. N., Shevchenko, A. T., & Shuntov A. V. (1997) Reliability Criterion Applied in Generating Capacity Planning. *Methodological Issues of Reliability Study of the Power Economy Large Systems. Series 49. Vol. 1. Power Economy Reliability: Economic and Information Aspects*, 49–56 (in Russian).
 9. Kulakov G. T., Kravchenko V. V., & Makosko Yu. V. (2012, 2013) Economical Efficiency Evaluation Technique of Implementing Innovation Systems in the TPP Automatic Control Systems. Part 1. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 5, 92–97, 2, 77–82 (in Russian).
 10. Karnitskiy N. B. (1999) *Synthesis of Reliability and Efficiency of the Thermal Power Plant Equipment*. Minsk, VUZ-YuNITI. 227 p. (in Russian).

Received: 24 June 2015

Accepted: 26 August 2015

Published online: 16 December 2015