

ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ ГЦН ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР

В.А. Хрусталева¹, Д.О. Башлыков¹, М.В. Гариевский²

¹Саратовский ГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия

²Саратовский научный центр РАН, г. Саратов, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, khroustalevva@mail.ru

Резюме: Сегодня важным является научное обоснование путей решения проблемы участия АЭС, как действующих, так и вновь сооружаемых, в регулировании графиков нагрузки. При этом недопустимо существенное снижение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) АЭС. Достаточные маневренность и приемистость оборудования АЭС – основа не только устойчивости крупных энергообъединений в режимах с нарушением частоты, но и безопасности собственно АЭС, которые должны обеспечивать охлаждение реакторной установки при аварийном снятии остаточного тепловыделения. Поэтому необходима возможность быстрых сбросов и набросов нагрузки на крупных энергоблоках АЭС, выделенных для противоаварийного регулирования частоты. Необходимый и быстрореализуемый запас в сторону роста мощности способны обеспечить высоковольтные частотно-регулируемые приводы (ВЧРП) главного циркуляционного насоса (ГЦН). Установка ВЧРП ГЦН целесообразна в перспективе для экономии расхода энергии на их привод на частичных режимах и для улучшения стабильности нейтронно-физических характеристик активной зоны в переменном переходных режимах. Вследствие ВЧРП ГЦН возможно, ограничивая расход теплоносителя в программе с постоянной средней температурой в активной зоне РУ, снизить повышение давления в ПГ на сходственных режимах, а значит, уменьшить расход энергии на привод питательного насоса.

Ключевые слова: атомная электростанция, главный циркуляционный насос, высоковольтный частотно-регулируемый привод, регулирование мощности реактора.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-08-00220 А).

EFFICIENCY PROBLEMS OF HIGH-VOLTAGE VARIABLE FREQUENCY DRIVES OF THE MCP OF NPP WITH WWER

V.A. Khroustalev¹, D.O. Bashlykov¹, M.V. Garievsky²

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

²Saratov Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, khroustalevva@mail.ru

Abstract: Today important is the scientific study of solutions to the problem of participation of nuclear power plants, both existing and newly built, in the regulation of load schedules. However unacceptable a significant reduction of the capacity factor of nuclear power plants. Sufficient flexible of NPP equipment is the basis not only of the stability of large power systems in modes with violation of the frequency but also safety of the nuclear power plants,

which would ensure cooling of the reactor during an accident. Therefore, the necessary capabilities of rapid discharges and increase in the load in large nuclear power plants, selected for emergency frequency control. High voltage variable frequency drives (VFD) of the main circulation pumps are able to provide the necessary reserve of growth power. Installation VFD of the MCPs are suitable for saving energy consumption in their drive on the partial regimes and to improve the stability of the neutron-physical active zone characteristics in variable modes. Using VFD of the MCPs can reduce increase pressures in the steam generators in the respective modes, restricting flow the coolant with a constant average temperature in the active zone of reactor, and therefore to reduce the energy consumption of the feed pump.

Keywords: nuclear power plant, main circulating pump, high-voltage variable-frequency drive, regulation of reactor power.

Acknowledgments: The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 17-08-00220 A).

В отечественной и зарубежной печати [1–6] показаны преимущества, уже достигнутые на реакторах БН и ожидаемые на ВВЭР в случае реализации регулирования тепловой мощности I-го контура расходом теплоносителя (соответственно натрия и воды), под давлением. Работы по внедрению ВЧРП жидкометаллических насосов на ряде российских энергоблоков с БН реакторами (Белоярская АЭС) уже выполнены и привели к улучшению динамических характеристик регулирования [1, 2].

Сегодня частотное регулирование приводов крупного насосного оборудования широко применяется на мощных ТЭЦ Мосэнерго (взамен гидромuft и направляющих аппаратов, соответственно, на питательных и циркуляционных насосах). Опубликованные данные свидетельствуют о значительной достигаемой при этом экономии и повышении эксплуатационной надежности по группе мощного насосного оборудования.

Регулирование подачи главных циркуляционных насосов ГЦН-195М и других типов в России изменением частоты оборотов в настоящее время находится в стадии исследования. По данным [3] осваиваются на энергоблоках последнего поколения с PWR в EdF Франции. Фирма ABB, считающаяся одним из мировых лидеров по проектированию и изготовлению приводов с переменным числом оборотов для разных направлений энергетического производства и, в том числе, для атомной энергетики (насосы питательной воды, циркуляционной охлаждающей воды), тем не менее, не упоминает ГЦН в рекламных проспектах.

Данные о ВЧРП ГЦН и др. крупных насосов во Франции свидетельствуют об улучшении характеристик и экономичности регулирования в дономинальном диапазоне нагрузок [3]. Вместе с тем отмечается, что ВЧРП ГЦН важен как источник дополнительного управляющего сигнала, снижающий инерционность в системе регулирования мощности РУ.

В Российской научно-технической периодике [4] также указывалось на возможность экономии энергии на привод ГЦН в режимах неполной нагрузки. Но основным тезисом было использование повышенного числа оборотов с целью «сдвига» в сторону увеличения граничного значения тепловых нагрузок ТВС в сечениях, где имеется опасность кризиса теплообмена. При этом, во-первых, возникает возможность некоторого дополнительного (сверх сегодня достигнутых 4% $N_{ном}$) режимного повышения мощности, во-вторых, – улучшения приёмистости (способности к динамическому восприятию «набросов» и «сбросов» нагрузки) в этом сверхноминальном диапазоне. Последнее очень важно для активного участия АЭС в регулировании частоты.

Первый фактор ценен в действующей экономической модели из-за роста номинальной мощности и валовой прибыли АЭС, особенно в условиях такого тарифного

меню, где выше стоимость пиковой, чем базовой, или, тем более, чем «провальной» энергии (ночные и выходные минимумы). Сюда следует отнести также неоспоримый вывод о выгоде замещения таким путем нового строительства АЭС, что обходится гораздо дешевле (по отношению к новому строительству) и составляет до 25–35% – из опыта России, и несколько дороже – из публикаций США по результатам перелицензирования энергоблоков АЭС, начиная с 80-х годов.

Второй фактор – приемистость – становится важным при растущей (высокой в перспективе) доле АЭС в объединенных энергосистемах, где следует возлагать на АЭС задачи безусловного участия в противоаварийном системном регулировании. Отметим, что такая системно-энергетическая задача возникает не только при опережающем развитии ядерной генерации, но и при разовом вводе достаточно крупных мощностей АЭС в слаборазвитых или локально-автономных энергосистемах с отсутствием или слабой пропускной (обменной) способностью связей с соседними ОЭС. Следует учитывать такую ситуацию также в связи с расширением географии зарубежных площадок под возведение АЭС по российским проектам.

Во всех перечисленных случаях наиболее мощные системообразующие станции при аварийном падении частоты в системе (дефицит генерации) должны быть готовы к набросу нагрузки +3–5% с высокой скоростью. Требования иметь быстрореализуемый «запас» по максимальной мощности при ВЧРП ГЦН выполнимы в большей мере. Подобный «запас» по экономическим соображениям более приемлем, если создается не новым строительством, а повышением мощности выше номинальной на уже действующих энергоблоках.

В данной работе рассмотрены особенности использования ВЧРП ГЦН в дономинальной области нагрузок 100–70%. В ночные периоды, выходные и праздничные дни этот диапазон пока более характерен для относительно слабых ОЭ в районах выбранных зарубежных площадок будущих российских АЭС, однако в ближайшем будущем возможен для отдельных ОЭС РФ.

При выборе программы изменения числа оборотов ГЦН рассматривалось уравнение теплоты, передаваемой в ПГ при номинальной и всех сниженных нагрузках от теплоносителя к котловой воде через поверхность, общую для 4-х ПГ с осредненным коэффициентом теплопередачи.

Вопрос выбора задания программы собственно регулятора числа оборотов привода ГЦН требует специального рассмотрения. На данном этапе исследований предлагается на всех режимах поддерживать постоянное и в неизменном интервале ($t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$, $t_p = \text{const}$) значение Δt_t – подогрев теплоносителя в а.з., что позволит максимально стабилизировать поля энерговыделений (азимутальные, радиально-аксиальные) в процессе работы в режимах «слежения за нагрузкой» [7]. При этом закон изменения подачи теплоносителя ГЦН с ВЧРП выражается относительно простым соотношением (из-за того, что $\Delta t_{pv} = \text{const}$, $t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$): $\bar{G}_{Ti} = \bar{Q}_i = \text{var}$. В сопоставляемом процессе регулирования (без ВЧРП) $G_T = \text{const}$; $\Delta \bar{t}_{Ti} = \Delta \bar{h}_i$ при $t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$.

Рассмотрим следующие сходственные нагрузочные* режимы работы в 2-х программах (обе выполняются при $t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$): $\bar{G}_{Ti}$

режимы $\bar{N}_i$	с ВЧРП				Обычная без ВЧРП			
	1,0	0,9	0,8	0,7	1,0	0,9	0,8	0,7
$\Delta \bar{t}_{a.3.i}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7
$\bar{G}_{Ti}$	1,0	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0

* на первом шаге расчета предполагается $G_i/G_0 = \bar{G}_i = \bar{N}_i/\eta_i^{AЭС}$.

Для уточнения анализа предлагаемых программ: 1) $t_{cp}^{a.3}, \Delta t_{ti} = \text{const}$; $G_t, p_s^{ПГ} = \text{var}$ и 2) $t_{cp}^{a.3}, G_t = \text{const}$; $\Delta t_{ti} = \text{var}$; $p_s^{ПГ} = \text{var}$ необходимо найти формулы функциональной связи (в специальном подблоке свойств воды и водяного пара, включая массовую изобарную теплоемкость) [8].

Основные расчетные формулы:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_t}{e^{\Delta t_t \cdot k_t \cdot F / Q_i^{ПГ}} - 1}; t_s^{ПГ} = t_p^{(1)} - \Delta t_m. \quad (1)$$

Результаты расчета по формуле (1) при $t_{cp}^{a.3} = \text{const}$, $p_s^{ПГ} = \text{var}$ для случаев а) $G_t = \text{const}$; б) $G_t = \text{var}$ при $\Delta t_{ti} = \text{const}$ представлены в табл. 1, а на рис. 1, а, б изображены рассматриваемые случаи теплообмена в ПГ в диаграмме t - Q . Причем по оси абсцисс отмечают не удельную, а полную теплоту, – это вызвано меняющимся на разных режимах соотношением расходов рабочего тела и теплоносителя.

Таблица 1

Характеристики ПГ и ГЦН при $t_{cp}^{a.3} = \text{const}$, $p_s^{ПГ} = \text{var}$

Параметры	1,0	А) Программа – ВЧРП нет, $\bar{N}$			Б) Программа ГЦН с ВЧРП, $\bar{N}$		
		0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7
Подогрев теплоносителя в а.з. Δt , °С	32	28,8	25,6	22,4	32	32	32
Температура t_1 на входе в РУ, °С	290	291,6	293,2	294,8	290	290	290
Температура питательной воды $t_{пв}$, °С	220,0	214,6	208,6	202,1	214,6	208,6	202,1
Температура в ПГ $t_s^{ПГ}$, °С	280,4	282,8	285,2	287,6	282,0	283,6	285,1
Давление в ПГ, МПа	6,40	6,69	6,93	7,18	6,61	6,77	6,92
$Q_{ру}$, МВт(т) с учетом КПД	3121	2843	2564	2299	2843	2564	2299
Расход теплоносителя G_t , м ³ /ч	87000	87000	87000	87000	79268	71496	64088
Частота вращения ГЦН, % от ном	100%	100%	100%	100%	91,1%	82,2%	73,7%
Расход ГЦН, м ³ /ч	21750	21750	21750	21750	19817	17874	16022
Мощность ГЦН, кВт	4524	4524	4524	4524	3422	2511	1808
Мощность ГЦН, %	100%	100%	100%	100%	75,6%	55,5%	40,0%

Расчеты, результаты которых приведены в табл. 1, проводились по 2-м формулам: 1) по теплоте, подводимой к рабочему телу; 2) по теплоте, определяемой электрической мощностью и КПД блока на разных задаваемых режимах. В общих случаях требуется несколько шагов итерации, что приводит в практике расчетов к быстрой сходимости результатов (табл. 1):

$$\Delta t_{mij} = \frac{\Delta t_{tij}}{\exp\left(\frac{k_{ПГij} \cdot F \cdot \Delta t_{tij}}{D_{0i} \cdot (h_{0i}^s - h_{пвi})}\right) - 1} = \frac{\Delta t_{tij}}{\exp\left(\frac{k_{ПГij} \cdot F \cdot \Delta t_{tij}}{G_{pj} \cdot (h_j^{(2)} - h_j^{(1)})}\right) - 1}. \quad (2)$$

В этих формулах индексом i – обозначен режим изменения нагрузки (на первом шаге итерации – расхода пара в голову турбины), а индексом j – режим изменения частоты вращения ГЦН по программе привода. Индекс j не употребляется, если: а) исследуется процесс регулирования ПГ без использования ВЧРП; б) программа регулирования привода ГЦН и расхода в голову турбины жестко связана. Последний случай характерен для приведенного выше примера расчета. Индекс j относится к выбранному дополнительному

пути регулирования ПГ – функции изменения расхода теплоносителя. При этом некоторые характеристики, например $k_{ПГij}$, следует корректировать для режимов «i» и «j» с отличающимися соотношениями расходов рабочего тела и теплоносителя.

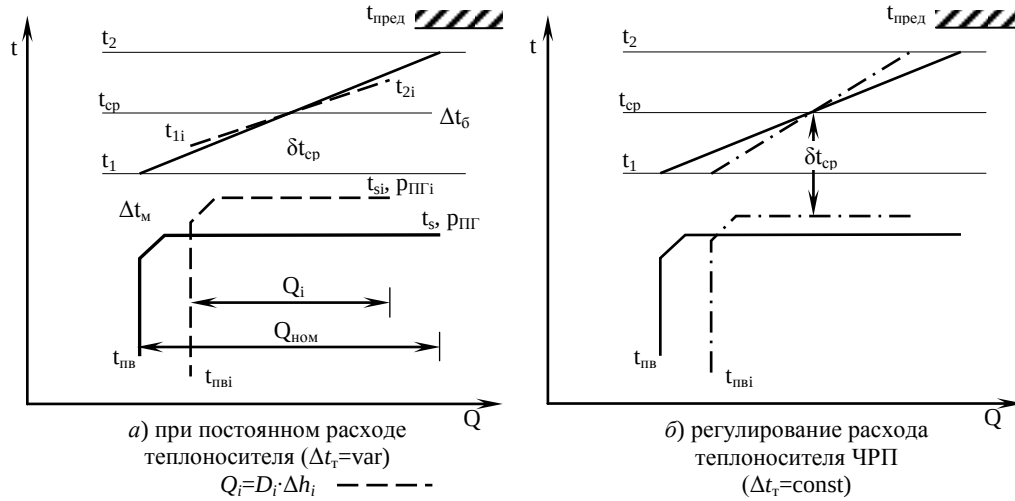


Рис. 1. Характерные t - Q диаграммы для регулирования ПГ по типу $t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$, $p_s^{ПГ} = \text{var}$ для вариантов: а) $G_T = \text{const}$; б) $G_T = \text{var}$ при $\Delta t_{ii} = \text{const}$; $G_{Ti}^{(a)} > G_{Ti}^{(б)}$; $p_{ПГi}^{(a)} > p_{ПГi}^{(б)}$; $N_{ГЦНi}^{(a)} > N_{ГЦНi}^{(б)}$

Помимо выигрыша в потребной мощности ГЦН будет снижаться мощность питательного насоса за счет снижения напора как функции $p_s^{ПГ}$ (давление в деаэраторе предполагалось постоянным).

Условия, при которых это может быть обеспечено, найдем из совместного рассмотрения балансовых уравнений теплопередачи в ПГ и подвода тепла к питательной воде (рабочему телу):

$$Q_i = \bar{Q}_i \cdot Q_{\text{ном}} = k_{ПГi} \cdot F \cdot \frac{\Delta t_{Ti}}{\ln \left(1 + \frac{\Delta t_{Ti}}{\Delta t_6} \right)} = \bar{G}_{Ti} \cdot G_{\text{рв.ном}} \cdot (h_1 - h_2) = \bar{D}_i \cdot G_0 \cdot (h_{0Si} - h_{пви}).$$

Здесь обозначения соответствуют принятым в формуле (2), значения давлений в ПГ показаны в табл. 1.

В случае другой программы регулирования ПГ – $p_s^{ПГ} = \text{const}$, $t_{cp}^{a.3.} = \text{var}$ обеспечивается, как известно, пропуск пара в ЦВД на заданных нагрузках ниже номинальной с меньшим дросселированием в СРК (стопорно-регулирующих клапанах), чем в обычной программе при $t_{cp}^{a.3.} = \text{const}$ и растущем при этом $p_s^{ПГ}$. В сочетании с регулированием расхода теплоносителя ВЧРП ГЦН возможности программы $p_s^{ПГ} = \text{const}$ расширяются. Так, снижая расход теплоносителя при нагрузках менее номинальной, можно достигать меньших отклонений (снижений) $t_{cp}^{a.3.}$ в околономинальном режиме (от $\bar{N} = 1$ до $\bar{N}_{\text{доп}}$). Преимущества нейтронно-физического и общего эксплуатационного контроля активной зоны при этом отмечены рядом исследований [7, 9].

Данный алгоритм применим также для расчетов характеристик ПГ и ГЦН при программе регулирования $p_s^{ПГ} = \text{const}$; $t_{cp}^{a.3.} = \text{var}$ при $G_T = \text{const}$ и $G_T = \text{var}$ (табл. 2, рис. 2).

Из результатов (табл. 2) видно, что ВЧРП ГЦН на режимах нагрузки ниже номинальной в способе регулирования с $p_s^{\text{ПГ}} = \text{const}$ существенно снижает расход электроэнергии на привод ГЦН и уменьшает отклонения значений средней температуры в а.з. (т.е. повышает $t_{\text{ср}}^{\text{а.з.}}$) в сравнении с базовым вариантом (отсутствие ВЧРП).

Таблица 2

Характеристики ПГ и ГЦН при программе регулирования $p_s^{\text{ПГ}} = \text{const}$, $t_{\text{ср}}^{\text{а.з.}} = \text{var}$

Параметры	1,0	А) Программа – ВЧРП нет, $\bar{N}$			Б) Программа ГЦН с ВЧРП, $\bar{N}$		
		0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7
Подогрев теплоносителя в а.з., Δt , °C	32	28,8	25,6	22,4	32	32	32
Температура $t_{\text{пв}i}$, °C	220,0	214,6	208,6	202,1	214,6	208,6	202,1
Температура $t_s^{\text{ПГ}}$, °C	280,4	280,4	280,4	280,4	280,4	280,4	280,4
Давление в ПГ, МПа	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Температура t_1 на входе в РУ, °C	290,0	289,3	288,5	287,7	288,4	286,9	285,4
Температура t_2 на выходе из РУ, °C	322,0	318,1	314,1	310,1	320,4	318,9	317,4
Температура средняя в а.з. $t_{\text{ср}}^{\text{а.з.}}$, °C	306,0	303,7	301,3	298,9	304,4	302,9	301,4
Изменение $\Delta t_{\text{ср}}^{\text{а.з.}}$, °C	0	-2,3	-4,7	-7,1	-1,6	-3,1	-4,6
$Q_{\text{РУ}}$, МВт(т) с учетом КПД	3121	2843	2564	2299	2843	2564	2299
Расход теплоносителя G_{ji} , м³/ч	87000	87000	87000	87000	79561	72001	64738
Частота вращения ГЦН, % от ном	100	100	100	100	91,4	82,8	74,4
Расход ГЦН, м³/ч	21751	21751	21751	21751	19890	18000	16184
Мощность ГЦН, кВт	4524	4524	4524	4524	3460	2564	1864
Мощность ГЦН, %	100	100	100	100	76,5	56,7	41,2

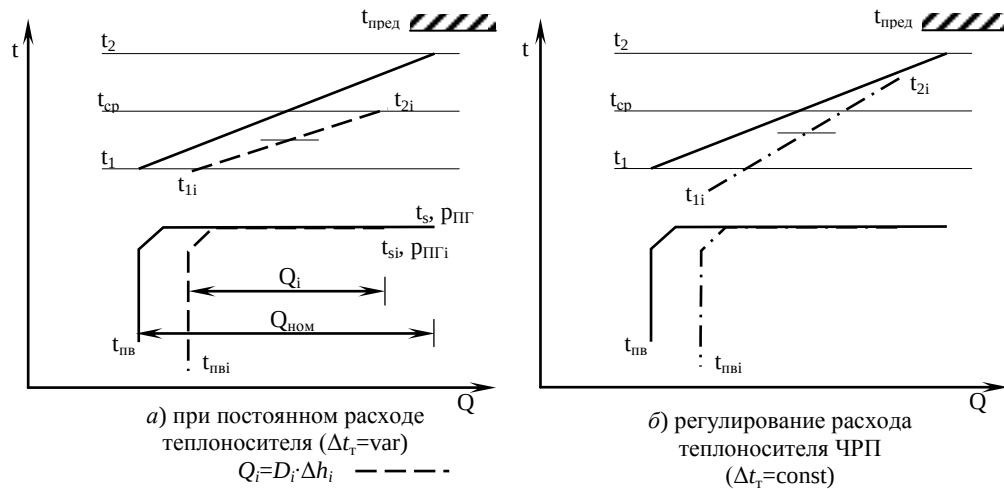


Рис. 2. Характерные t - Q диаграммы для регулирования ПГ по типу $p_s^{\text{ПГ}} = \text{const}$, $t_{\text{ср}}^{\text{а.з.}} = \text{var}$ для вариантов: а) $G_T = \text{const}$; б) $G_T = \text{var}$ при $\Delta t_{Ti} = \text{const}$; $G_{Ti}^{(a)} > G_{Ti}^{(б)}$; $\Delta t_{\text{ср}i}^{\text{а.з.}(a)} > \Delta t_{\text{ср}i}^{\text{а.з.}(б)}$

Использование ВЧРП ГЦН сопряжено с необходимостью ряда уточнений в алгоритме расчета, прежде всего речь идет о коэффициенте теплопередачи в ПГ. Указанный вопрос требует проработки с экспериментальными исследованиями. Здесь приведем, в

соответствии с [10], инженерные оценочные расчеты для условий «неразрывности» течения $G_T v_{рв} = F_{ПГ} W_{рв}$:

$\alpha_{рв}$ – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя (реакторной воды) к стенке трубок ПГ и термическое сопротивление при скоростях:

$W_{рв}$, м/с	3,5	4,4	5,6
$\alpha_{рв}$, кВт/м ² ·К	25,3	30,7	36,8
$R_{рв}$, м ² ·К/кВт	0,04	0,033	0,027

Данные по $\alpha_{рв}$ в области скоростей до 8 м/с аппроксимируются: $\alpha_{рв}=25,3-5,4(W_{рв}-2,1)$, кВт/м²·К; $v_{рв}$, $W_{рв}$ – соответственно удельный объем и скорости воды, м³/кг и м/с.

При коэффициенте теплопроводности стали ОХ18Н10Т (при $t=295^\circ\text{C}$) $\lambda_{ст} = 0,188$ кВт/м·К. При толщине стенки $1,4 \cdot 10^{-3}$ м термическое сопротивление стенки $R_{ст} = \delta_{ст}/\lambda_{ст} = 0,0745$ м²·К/кВт. Термическое сопротивление окисных пленок (внешней и внутренней) $2R_3 = 2\delta_3/\lambda_3 = 0,015$ м²·К/кВт.

Указанные значения составляют (оценены или приняты по работе [10]):

коэффициент теплоотдачи и термическое сопротивление от стенки трубок ПГ к кипящей воде при скоростях движения пароводяной смеси:

$W_{пв}$, м/с	0,85	1,15	1,55
$\alpha_{пв}$, кВт/м ² ·К	10,7	14,7	17,9
$R_{пв}$, м ² ·К/кВт	0,093	0,068	0,056

$k_{ПГ}$ – осредненный коэффициент теплопередачи в ПГ при скоростях:

$W_{рв}$, м/с	3,5	4,4	5,6
$W_{пв}$, м/с	0,85	1,15	1,55
$k_{ПГ}$, кВт/м ² ·К	4,4	5,1	5,65
$R_{ПГ}(\text{расч})$, м ² ·К/кВт	4,49	5,25	5,8

Другим важным вопросом при реализации частотного регулирования привода ГЦН является вопрос об изменении (возможном снижении) критического теплового потока $q_{кр}$ в наиболее напряженных участках активной зоны. Для иллюстрации используем уравнение для оценки $q_{кр}$ В.С. Осмачкина в упрощенной форме, подходящей для РУ ВВЭР [9], иногда именуемое формулой Ю.А. Безрукова (1976 г.):

$$q_{кр} = A \cdot (1-x)^n \cdot G_{ру}^m \cdot (1-0,0185 \cdot p), \quad (3)$$

где A – коэффициент; для продольного обтекания гладкотрубных поверхностей в условиях, близких к РУ ВВЭР, $A=0,795$; x – массовое паросодержание потока в рассматриваемом слое а.з.

Для условий современных расчетов (40–60 слоев) по высоте проверяются несколько слоев в середине а.з. Имеющийся энтальпийный запас до значения энтальпии точки кипения

выражается как отрицательное значение $x = \left| \frac{h_{п} - h'_B}{r'_B} \right|$ – отклонение разности энтальпий

реального потока и потока в состоянии начала закипания (в центральных сечениях слоев) к скрытой теплоте парообразования r'_B при давлении в корпусе РУ. Очевидно, что запасы $q_{кри}$ определяются с учетом изменения расхода теплоносителя в степени m . Это показано на рис. 3.

Показатель степени в формуле (3) при $p=16$ МПа $n=0,105p-0,5=1,18$. Последний множитель в формуле (3) при давлении теплоносителя 16 МПа равен 0,704.

Более детального определения (с учетом конкретного обтекания в ТВС в конструктивно задаваемой а.з.) требует степенной показатель при 3-м множителе m , рекомендуемый в широком диапазоне $m=0,184-0,311$. Предварительную оценку $q_{кр}$ проведем для среднего значения $m=0,247$. Отметим, что в границах этого диапазона m

результаты расчета $q_{кр}$ могут существенно отличаться. Прежде всего это связано с гидравлическим влиянием профиля загружаемых ТВС (перекрестное перемешивание, порядная прогонка, антидебризные вставки и т.д.). Для «средних» условий:

$$q_{кр} = 0,560 \cdot (1 - x)^{1,18} \cdot G^{0,247} . \quad (4)$$

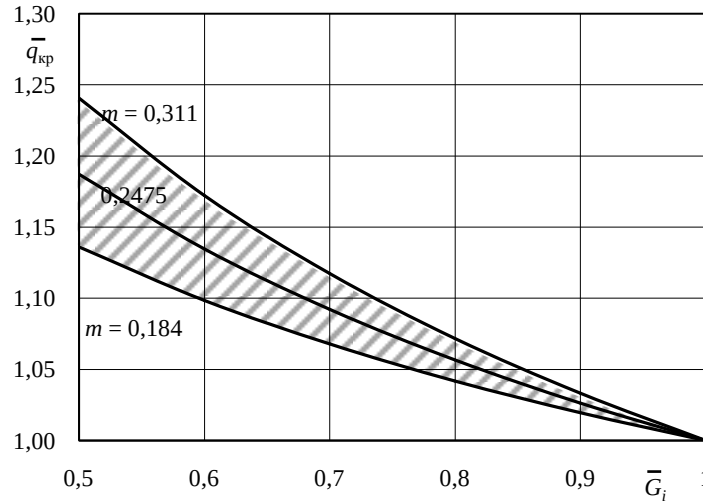


Рис. 3. Зависимость $\bar{q}_{кр i}$ от расхода теплоносителя $\bar{G}_i$ при различном показателе степени m

Из формулы (4) видно, что основное влияние на снижение $q_{кр}$ оказывает степенная функция $G^{0,247}$. При $p_t = \text{const}$ и программах регулирования ПГ АЭС с неглубокой их разгрузкой, особенно при условии $t_{ср}^{a.3.} = \text{const}$, можно пренебречь различиями во втором сомножителе, то есть

$$\bar{q}_{кр i} = \bar{G}_i^{0,247} = \left(\frac{G_{ном}}{G_i} \right)^{0,247} ,$$

где $\bar{G}_i = f(\bar{N}_i)$ – заранее доказательно выбранная функция изменения расхода теплоносителя при установке ВЧРП ГЦН. Названная функция – неотделимый признак программы – должна формироваться по двухцелевому признаку. Для однозначных относительных нагрузок, во-первых, снижение расхода в допустимых пределах по условию $q_j^{\max} < \bar{q}_{кр}$ в наиболее напряженных сечениях должно приводить к снижению мощности ГЦН. Во-вторых, изменение расхода целесообразно выполнять так, чтобы при этом другие связанные в едином процессе регулирования параметры приводили к улучшению, а не ухудшению нейтронно-физических характеристик зоны на этих режимах [7].

Для расчетных интервалов по запасу кризиса теплообмена k_{DNBR} (Departure from nucleate boiling ratio = 1,3÷1,6) такой диапазон изменения $\bar{q}_{кр i}$ всегда допустим.

Следует также учитывать, что в расчетах величина фактического теплового потока в а.з. формируется с учетом коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{d_{экв}} \cdot k \cdot \text{Re}_{ij}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,33} ,$$

где индексы i и j указывают, соответственно, на режим нагрузки и номер слоя; λ_{ij} – коэффициент теплопроводности через циркониевую оболочку твэла, твэга; $d_{экв}$, k – эквивалентный диаметр и коэффициент гексагональной решетки; Re и Pr – критерии Рейнольдса и Прандтля.

Зависимым от скорости теплоносителя в слоях является только $Re = W_j \cdot d_{\text{экв}} / \nu_j$, что придает линейный характер зависимости фактической тепловой нагрузки от расхода теплоносителя. Это, в свою очередь, увеличивает отношение $q_{\text{кр}}/q$, т.е. коэффициент $DNBR$, а значит и безопасность. Возможные вибрационные проявления в период изменения расхода теплоносителя можно, по предварительной оценке, снижать, например, применяя методы авторов [11].

Эффект экономии затрат на собственные нужды (привод ГЦН) на режимах неполной нагрузки консервативно примем для условий перспективных графиков нагрузки в энергообъединениях с высокой (системообразующей) долей АЭС. Это возможно при выполнении проектных условий зарубежного заказчика («Аккую» – Турция, «Руппур» – Бангладеш, Иордания, Египет, «Бушер-2» – Иран, «Кудан-Кулам» – Индия и т.д.) и также в некоторых ОЭС России с высокой долей АЭС.

Требования снижения нагрузки в ночные, праздничные, выходные сутки могут составить, в итоге, до мощности 70% от номинальной, длительностью от 2000 до 4000 часов в год (τ_r). В этом случае экономия затрат на привод ГЦН составит в годовом исчислении ($\Delta \mathcal{E}_{\text{ГЦН}}$) на 1 блок 1000 МВт

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ГЦН}}^{\text{Г}} = \Delta N_{\text{ГЦН}}^{\text{ЧРП}} \cdot \tau_r \cdot n_{\text{ГЦН}} \cdot (1 - \delta_{\text{пот}}^{\text{п.у}}) \cdot T_{\text{я}},$$

где $\Delta N_{\text{ГЦН}}^{\text{ЧРП}}$ – общее снижение мощности ГЦН на блоке при работе с неполной нагрузкой 70% $N_{\text{ном}}$; $\delta_{\text{пот}}^{\text{п.у}}$ – процент дополнительных потерь на преобразовательном устройстве ВЧРП; $T_{\text{я}}$ – ценовой тариф на энергию АЭС, руб/МВт·ч.

На рис. 4 показана ожидаемая экономия от перевода с обычного на ВЧР привод ГЦН при тарифном диапазоне на энергию от 1500 до 2000 руб/МВт·ч.

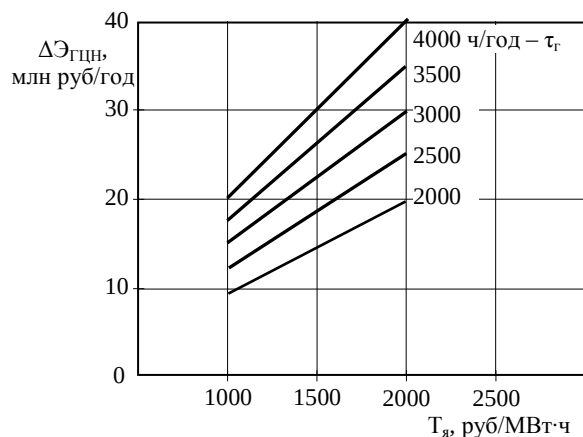


Рис. 4. Экономия затрат от ВЧРП ГЦН при разных тарифах на электроэнергию АЭС
Работа с неполной нагрузкой – 70% в течение τ_r часов в году (программа поддержания $p_{\text{пл}} = \text{const}$)

Экономия, достигаемая на рис. 4, является консервативно минимальной. Но даже без учета дополнительных преимуществ, достигаемых при ВЧРП ГЦН за счет улучшения регулировочных процессов, с учетом предварительной оценки затрат в ВЧРП, сделанной предварительно в работе [4], можно оценить срок окупаемости подобной реконструкции АЭС как не превышающий 3,5–4 лет.

Как отмечено в работе [4], пока не сняты трудности с установкой и эксплуатацией мощных преобразователей и др. элементов ВЧРП, решения которых находятся за рамками данной статьи.

Выводы

1. Разработаны расчетные процедуры реакторно-парогенераторного узла при нагрузках ниже номинальной в условиях регулирования расхода теплоносителя ГЦН с высоковольтными частотно-регулируемыми приводами, выполнены расчеты характеристик процессов регулирования.

2. Показаны преимущества системы регулирования ПГ с использованием дополнительного импульса по расходу теплоносителя в РУ, возможные трудности. Так, экономия годовых затрат при переходе к регулированию ГЦН частотно-регулируемыми приводами может составить до 40 млн. рублей в год при работе блока с нагрузкой 70% в течение 4000 ч/год. Растет запас до кризиса теплообмена, удается применить более благоприятное по нейтронно-физическим показателям параметрическое регулирование активной зоны и парогенераторов реакторной установки.

Обоснована необходимость дальнейших исследований совместно со специалистами в области силовой электроники и АСУ ТП для заблаговременного решения проблемных вопросов и задач.

Литература

1. Лазарев Г.Б., Новаковский А.Н., Султанов А.Т. Энергоэффективное управление расходом теплоносителя в главных контурах реакторных установок энергоблоков АЭС // Энергия единой сети. 2015. № 4 (21). С. 70–88.
2. Черемисин В.В., Шилов Е.А., Анишев Е.Ю. Опыт эксплуатации регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов реактора БН-600 // Электрические станции. 2005. № 5. С. 19–21.
3. Зыков А.С. Частотно-регулируемый электропривод // Росэнергоатом. 2013. № 7. С. 44–47.
4. Хрусталева В.А., Башлыков Д.О. Применение частотного регулирования ГЦН для повышения номинальной мощности ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120, № 2. С. 90–95.
5. Ciufu L., Popescu M. O. Introducing energy efficiency in nuclear power plants by using variable medium voltage frequency drives // Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2015 9th International Symposium on. IEEE, 2015. pp. 873–876. DOI: 10.1109/ATEE.2015.7133924.
6. Sirovy M., Peroutka Z., Molnar J., Michalik J., Byrtus M. Variable speed pumping in thermal and nuclear power plants: Frequency converter versus hydrodynamic coupling // Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on. IEEE, 2011. pp. 228–234. DOI: 10.1109/PEDS.2011.6147251.
7. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2010. Т. 109, вып. 4. С. 198–202.
8. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 224 с.
9. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. и др. М.: Логос, 2010. 604 с.
10. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1987. 384 с.
11. Способ предотвращения резонансных вибраций ТВЭЛ и ТВС ВВЭР-1000 / К.Н. Проскуряков, Ф.Н. Шакирзянов, В.В. Каратаев, К.С. Новиков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2008. № 23. С. 18–25.

Авторы публикации

Хрусталева Владимир Александрович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Ю.А. Гагарина E-mail: khroustalevva@mail.ru.

Башлыков Дмитрий Олегович – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Ю.А. Гагарина

Гaриевский Михаил Васильевич – научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук (СНЦ РАН).

References

1. Lazarev G.B., Novakovsky A.N., Sultanov A.T. Energy-efficient management of coolant flow in the main circuits of reactor units of power units of nuclear power plants // Energy Unified Grid. 2015. No. 4 (21). pp. 70–88.[in Russian].
2. Cheremisin V.V., Shilov E.A., Anishev E.Yu. Experience in the Operation of Adjustable Electric Drives of Main Circulation Pumps of BN-600 Reactors // Power Technology and Engineering. July 2005, Vol. 39, Issue 4, pp. 218–220. DOI: 10.1007/s10749-005-0311-7.
3. Zykov A.S. Frequency-regulated electric drive // Rosenergoatom, 2013, No. 7, pp. 44–47 [in Russian].
4. Khrustalev V.A., Bashlykov D.O. Application of the frequency regulation of the MCP to increase the rated power of the VVER // Atomic energy, June 2016, Vol. 120, Issue 2, pp. 112–118. DOI: 10.1007/s10512-016-0104-0.
5. Ciufu L., Popescu M. O. Introducing energy efficiency in nuclear power plants by using variable medium voltage frequency drives // Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2015 9th International Symposium on. IEEE, 2015. pp. 873–876. DOI: 10.1109/ATEE.2015.7133924.
6. Sirovy M., Peroutka Z., Molnar J., Michalik J., Byrtus M. Variable speed pumping in thermal and nuclear power plants: Frequency converter versus hydrodynamic coupling // Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on. IEEE, 2011. pp. 228–234. DOI: 10.1109/PEDS.2011.6147251.
7. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperature regulation and maneuverability of VVER-1000 // Atomic energy, February 2011, Vol. 109, Issue 4, pp. 246–251 DOI: 10.1007/s10512-011-9352-1.
8. Aleksandrov A. A., Orlov K. A., Ochkov V. F., Thermophysical properties of working substances of heat power engineering. M.: MPEI Publishing house, 2009, p.224 [in Russian].
9. NPP with a reactor of the VVER-1000 type. From the physical bases of exploitation to the evolution of the project / S.A. Andrushechko, A.M. Afrov, B.Yu. Vasiliev, V.N. Generalov, K.B. Kosourov, Yu.M. Semchenkov, V.F. Ukrainev. Moscow: Logos, 2010, p. 604 [in Russian].
10. Rassokhin N.G. Steam generating sets of nuclear power plants. 3rd ed. Moscow: Atomizdat, 1987, p. 384 [in Russian].
11. A method for preventing resonant vibrations of TVEL and TVS VVER-1000 / K.N. Proskuryakov, F.N. Shakirzyanov, V.V. Karataev, K.S. Novikov // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Ensuring the safety of nuclear power plants. 2008. No 23. pp. 18–25[in Russian].

Authors of the publication

Vladimir A. Khrustalev – doctor of tech. sciences, professor of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Dmitry O. Bashlykov – cand. sci. (techn.), assistant of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Mikhail V. Garievsky – researcher of the Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

Поступила в редакцию

09 августа 2017 г.