

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-497-508>

УДК 621.311.001.57

Структурно-экономический подход при выборе пиковых регулирующих мощностей на тепловых электростанциях

Е. В. Богдан¹⁾, Н. Б. Карницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Выход энергоблока № 2 Белорусской АЭС на уровень освоения нейтронной мощности 100 % от номинальной изменил структуру генерации Объединенной энергетической системы (ОЭС) Беларуси. При текущих нагрузках межотопительного периода 2023 г. доля атомной электростанции с работающими на полной мощности двумя энергоблоками в суточной структуре генерации республики составляет порядка 50 %. Для балансирования ОЭС при работе двух энергоблоков атомной электростанции в ночные часы требуется применение регулировочных мероприятий, превышающих по объему имеющиеся возможности. Почти полное использование регулировочного диапазона ТЭС вынужденно приведет все в более широких масштабах к останову блоков на время провалов нагрузки ночью с последующим пуском из неостывшего и горячего состояний. Данные режимы работы генерирующего оборудования неизбежны в сложившихся условиях рынка электроэнергетики, что обусловило появление сложнейших задач по оценке экономической и технической эффективности привлечения к подобным режимам того или иного оборудования электростанций. В работе предложен подход к решению задачи синтеза надежности и экономичности энергетических систем на примере газовых турбин и крупных энергоблоков ПГУ. Получена обобщенная функция желательности, включающая в себя ряд параметров для выбора рационального соотношения и взаимовлияния между надежностью и экономичностью производства электроэнергии при участии оборудования тепловых электростанций в регулировании суточного графика нагрузок. Предложенная математическая модель является эффективным средством анализа пригодности оборудования к привлечению для работы в требуемых режимах эксплуатации.

Ключевые слова: тепловая электростанция, энергосистема, АЭС, суточный график электрических нагрузок, экономичность, надежность, функция желательности, шкала желательности, газовая турбина, парогазовый энергоблок, пуск энергоблока, наработка, оптимизация

Для цитирования: Богдан, Е. В. Структурно-экономический подход при выборе пиковых регулирующих мощностей на тепловых электростанциях / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 6. С. 497–508. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-497-508>

Адрес для переписки

Карницкий Николай Борисович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence

Karnitski Mikalai B.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Structural and Economic Approach to the Selection of Peak Regulating Capacities at Thermal Power Plants

E. V. Bohdan¹⁾, M. B. Karnitski¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The output of power unit No 2 of the Belarusian NPP to the level of neutron power development of 100 % of the nominal level has changed the structure of generation of the Unified Energy System (UES) of Belarus. At the current loads of the inter-heating period of 2023, the share of a nuclear power plant with two power units operating at full capacity in the daily generation structure of the Republic is about 50 %. In order to balance the UES of Belarus during the operation of two power units of a nuclear power plant at night, the application of adjustment regulatory measures that exceed the available capabilities is required. The almost complete use of the adjusting range of the CHP will forcibly cause, on a larger scale, to the shutdown of the blocks during the load failures at night, followed by the start-up from the non-cooled and hot statuses. These operating modes of generating equipment are inevitable in the current conditions of the electricity market, which has led to the emergence of most complex tasks to assess the economic and technical efficiency of involving or another equipment of power plants in such modes. The paper proposes an approach to solving the problem of achieving an effective combination of reliability and efficiency of energy systems on the example of gas turbines and CCGT power units. A generalized desirability function has been obtained, which includes a number of parameters for choosing a rational relationship and mutual influence between the reliability and efficiency of electricity production with the participation of thermal power plant equipment in regulating the daily load schedule. The proposed mathematical model is an effective means of analyzing the suitability of equipment for use in the required operating modes.

Key words: thermal power plant, power system, nuclear power plant, daily schedule of electrical loads, efficiency, reliability, desirability function, desirability scale, gas turbine, combined cycle power unit, power unit start-up, operating time, optimization

For citation: Bohdan E. V., Karnitski M. B. (2023) Structural and Economic Approach to the Selection of Peak Regulating Capacities at Thermal Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (6), 497–508. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-497-508> (in Russian)

Введение

В настоящее время суточный объем электропотребления республики в рабочие дни межотопительного периода составляет порядка 109,5 млн кВт·ч, при этом суммарная выработка двух энергоблоков АЭС на уровне нагрузки 100 % достигает значений 54,7 млн кВт·ч. В рабочие дни в структуре покрытия суточного максимума электропотребления доля генерации двух энергоблоков АЭС составляет 44 %, в структуре покрытия суточного минимального электропотребления – 70 %.

Для балансирования Объединенной энергетической системы (ОЭС) Беларуси при работе двух энергоблоков атомной электростанции в ночные часы требуется применение регулировочных мероприятий, превышающих по объему имеющиеся возможности. Так, в 2023 г. для устранения небаланса в ночные часы применялись мероприятия по отключению генерирующего оборудования в различных сочетаниях в зависимости от величины небаланса и включению его в часы пикового электропотребления.

С целью максимально полного сохранения теплофикационной выработки при работе двух блоков АЭС в межотопительный период для обеспечения баланса электрических мощностей энергосистемы в часы минимальных нагрузок потребуется ежесуточное отключение в резерв конденсационного оборудования с включением его в дневные часы. Данные режимы работы генерирующего оборудования неизбежны в сложившихся условиях рынка электроэнергии [1–7], что обусловило появление сложнейших задач по оценке экономической и технической эффективности привлечения к подобным режимам того или иного оборудования электростанций. Известно, что математический аппарат теории надежности технических систем достаточно развит, однако существующие теоретические подходы не всегда учитывают специфику задач надежности электроснабжения и изучены недостаточно [8, 9]. Поэтому на данном этапе разработка моделей и подходов решения задач синтеза надежности и экономичности энергетических систем, основанных на использовании современных математических средств, особенно актуальна.

Основная часть

Задачу оптимизации процессов, характеризующихся несколькими откликами, обычно сводят к задаче оптимизации по одному критерию с ограничениями. Задачу синтеза надежности и экономичности можно решить, в частности, используя обобщенную функцию желательности D , предложенную Харрингтоном [10]. Для построения обобщенной функции желательности D предлагается преобразовать значения откликов в безразмерную шкалу желательности d . Построение шкалы желательности, которая устанавливает соотношение между значением отклика y и соответствующим ему значением d (частной функцией желательности), отражает отношение исследователя к отдельным откликам.

Для построения шкалы желательности удобно использовать метод количественных оценок с интервалом значений желательности от нуля до единицы [11]. Значение $d = 0$ (или $D = 0$) соответствует абсолютно неприемлемому значению данного отклика, а $d = 1$ (или $D = 1$) – самому лучшему значению отклика, причем дальнейшее улучшение его или невозможно, или не представляет интереса. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Базовые отметки шкалы желательности

Basic marks of the desirability scale

Количественная отметка на шкале желательности	Желательность значения показателя
0,80–1,00	«Очень хорошо»
0,63–0,80	«Хорошо»
0,37–0,63	«Удовлетворительно»
0,20–0,37	«Плохо»
0,00–0,20	«Очень плохо»

Построенная в соответствии с табл. 1 шкала d представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой любой отклик может быть преобразован так, чтобы его можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для специфического применения. Последовательность расчетов для преобразования откликов в частные функции желательности представлена в [10, 12]. Имея несколько откликов, преобразованных в шкалу d , комбинируется обобщенный показатель желательности D как среднее геометрическое частных функций желательности, т. е.

$$D = \sqrt[k]{d_1 d_2 \dots d_k}. \quad (1)$$

Почти полное использование регулировочного диапазона ТЭС вынужденно приведет все в более широких масштабах к останову блоков, в том числе и ПГУ, на время провалов нагрузки ночью с последующим пуском из неостывшего и горячего состояний. Для обеспечения экономичной и надежной эксплуатации энергосистемы во время провалов электрического потребления в ночные часы энергоблоки должны обладать благоприятными пусковыми характеристиками, соответствовать техническим требованиям по маневренности [13]. Как известно, наиболее значимыми эксплуатационными характеристиками, определяющими маневренность ПГУ, являются продолжительность пусковых операций, скорость изменения нагрузки и величина регулировочного диапазона. В данной работе в качестве отклика выбран промежуток времени до выдачи в сеть требуемой нагрузки (один из показателей надежности работы энергосистемы в разрезе регулирования суточного графика нагрузок [14–16]).

Ввиду низких маневренных характеристик, а также физического и морального износа оборудования традиционных паротурбинных ТЭС возможность обеспечения отпуска электроэнергии для покрытия пиков и компенсации провалов графика электрических нагрузок паротурбинными установками сильно ограничена. Более целесообразным видится использование высокоманевренных парогазовых установок для выполнения переменного суточного графика нагрузок. Периодические изменения нагрузок в сочетании с остановом блоков на ночное время вызывают циклическую усталость материала элементов энергоблока. Долговечность материалов, в особенности работающих при высоких температурах, исчерпывается, что приводит к уменьшению межремонтного периода установки в целом и должно учитываться при выборе оборудования в качестве варианта балансирования в ночные часы [17]. Таким образом, для проведения расчетов в данной работе в качестве отклика также была выбрана величина сокращения межремонтного периода для выбранного режима эксплуатации вследствие увеличения средней наработки.

Процесс эксплуатации оборудования в условиях, характеризующихся систематическими изменениями нагрузки и остановами в резерв в ночное время с последующим пуском, представляет не только потенциальную угрозу долговечности элементов блока, но и связан со значительными по-

терями теплоты и энергии. Целесообразность привлечения конкретных единиц оборудования к регулированию нагрузок должна оцениваться с экономической точки зрения. Для оценки эффективности работы в условиях Беларуси и стран СНГ предложено пользоваться таким показателем, как удельный расход условного топлива (УТР) на выработку электроэнергии при выбранном режиме эксплуатации [18]. Данный подход позволяет избежать значительных колебаний, характерных сегодня для стоимостных показателей (в особенности для топлива).

Зададимся режимом работы энергосистемы, при котором необходимо набрать в часы пикового потребления нагрузки 400 МВт мощности. Длительность выдачи в сеть требуемой нагрузки – два часа с последующим отключением блока в резерв и ежесуточным пуском из неостывшего состояния. Пример оценки возможности работы парогазового энергоблока [19], а также УРТ при выбранном режиме на примере ПГУ-400 приведен ниже.

Для каждого этапа пуска блока ПГУ указаны основные операции по переключениям в технологической схеме, а также нормативная длительность его прохождения при пусках из соответствующих начальных тепловых состояний: холодного, неостывшего и горячего. В рассматриваемом случае (для пуска из неостывшего состояния) имеем минимальную длительность основных этапов, представленную в табл. 2. Таким образом, при нахождении в сети только 2 ч ПГУ не успеет набрать номинальную нагрузку. Из неостывшего состояния минимальное расчетное время набора нагрузки 400 МВт составляет 3 ч. Соответственно работа ПГУ-400 с номинальной нагрузкой в течение двух часов в сутки будет сопровождаться дополнительной выработкой электроэнергии. Результаты расчета времени на пуск и расхода условного топлива на проведение пусковых операций сведены в табл. 2.

Для выбранного режима работы общий фактический расход условного топлива за сутки будет складываться из расхода топлива, затраченного на резерв и пусковые операции до розжига горелок $B_{рез}$, расхода топлива непосредственно на пуск $B_{пуск}$ и расхода топлива на работу с нагрузкой 400 МВт в течение двух часов. С учетом затрат электроэнергии на пусковые операции до розжига горелок, останов, содержание в резерве и затрат пара на пуск средняя часовая потребляемая мощность на собственные нужды составит порядка 6 МВт. Расход пара от пиковой резервной котельной на охлаждение ЦНД 75 т (30 т/ч за 2,5 ч), что эквивалентно $B_{рез} \approx 5$ т у. т. Результаты расчета удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при работе ПГУ 5 ч в сутки сведены в табл. 3.

При варианте остановки блоков ПГУ на ночь с последующим их пуском и работой на номинальной нагрузке в часы пиков потребления электроэнергии будет происходить потеря экономичности отдельно взятых станций. Расчеты удельных расходов топлива на выработку электроэнергии показали, что для выбранного режима эксплуатации удельный расход топлива на выработку электроэнергии для энергоблока ПГУ-400 составит 320,3 г у. т./(кВт·ч). Однако в рамках энергосистемы останов ПГУ позво-

лит не снижать нагрузку более экономичных теплофикационных блоков и сбалансировать суточный график нагрузок согласно требованиям энергосистемы.

Таблица 2

Результаты расчетов пуска

Results of start-up calculations

Параметр	От розжига горелок до выхода на частоту 3000 об/мин	Синхронизация, включение в сеть и набор 50 МВт – выход на горячую отмывку	Горячая отмывка	Набор нагрузки до 200 МВт с подключением паровой турбины	Набор нагрузки до 400 МВт	Итого
Время	15 мин	10 мин	1,5 ч	1 час	15 мин	3 ч 10 мин
Нагрузка, МВт	0	0–50	50	50–200	200–400	–
Выработка, МВт·ч	0	5	75	130	75	285
Потребление на собственные нужды, МВт·ч	2,2	1,5	13,5	9	2,5	28,7
Отпуск электроэнергии, МВт·ч	–	3,5	61,5	121	72,5	256,3
Расход газа, м ³ /ч	4000–22000	22000–28000	28000	28000–43000	43000–76000	–
Расход газа за этап пуска, м ³	4500	4500	42000	36000	14200	101200
Расход условного топлива за этап пуска, т у. т.	5,207	5,207	48,600	41,657	16,431	117,1

Таблица 3

Работа ПГУ 5 ч/сут.

CCGT operation during 5 hours per 24 hours

Параметр	Резерв и пусковые операции до розжига горелок	От розжига горелок до 400 МВт	Работа с нагрузкой 400 МВт	Суточные показатели
Время	18 ч 50 мин	3 ч 10 мин	2 ч	24 ч
Выработка, МВт·ч	0	285	800	1085
Потребление на СН, МВт·ч	115	28,7	18	161,7
Отпуск электроэнергии, МВт·ч	0	256,3	782	923,3
Расход условного топлива, т у. т.	5	117,1	173,6	295,7
Удельный расход условного топлива, г у. т./кВт·ч	828,8		222,0	320,3

Приведенные данные позволяют сформировать функции желательности для анализа вариантов работы оборудования в переменной части графика нагрузок с точки зрения влияния на надежность и экономичность системы. В качестве откликов были использованы: y_1 – удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, г у. т./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$); y_2 – сокращение межремонтного периода для выбранного режима эксплуатации вследствие увеличения средней наработки, о. е.; y_3 – промежуток времени до выдачи в сеть требуемой нагрузки, ч. С использованием методики и рекомендаций, предложенных в [8, 12], выбираются значения y_i , соответствующие двум базовым отметкам по шкале желательности (табл. 4).

Таблица 4

Построение шкалы желательности
Preparation a desirability scale

Параметр	y_1 , г у. т./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$)		y_2 , о. е.		y_3 , ч	
Значение свойств	280	350	0,05	0,2	0,5	5
Числовые отметки по шкале желательности d	0,63	0,2	0,63	0,2	0,63	0,2

Преобразование отклика y в частную функцию желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \quad (2)$$

где $y' = b_0 + b_1 y$.

Коэффициенты b_0 и b_1 определяли по данным табл. 4 путем подстановки значений d в уравнение (2) и решением системы. Следовательно, частные функции желательности имеют вид:

$$d_1 = \exp[-\exp(5,079 - 0,0154y_1)]; \quad (3)$$

$$d_2 = \exp[-\exp(1,1153 - 7,2066y_2)]; \quad (4)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(0,8751 - 0,2402y_3)]. \quad (5)$$

Таким образом, для всех вариантов (табл. 5) частные функции желательности можно определять по формулам (3)–(5).

Обобщенная функция желательности определена по формуле (1) и имеет вид

$$D = \exp\left\{-\frac{1}{3}\left[\exp(5,079 - 0,0154y_1) + \exp(1,1153 - 7,2066y_2) + \exp(0,8751 - 0,2402y_3)\right]\right\}. \quad (6)$$

Таблица 5

Расчет обобщенной функции желательности
A generalized desirability function calculation

Номер варианта	Объект	Вид топлива и состояние источника	d_1	d_2	d_3	D
1	ПРЭИ на базе SGT-800	Газ	0,4462	0,6457	0,6424	0,5699
2		Дизтопливо	0,3956	0,6457	0,6389	0,5465
3	ПГУ-400 Минская ТЭЦ-5	Горячее	0,5008	0,4514	0,4096	0,4524
4		Неостывшее	0,4165	0,4514	0,4096	0,4255
5		Холодное	0,3051	0,4514	0,1263	0,2591
6	ПГУ-427 Березовская ГРЭС	Горячее	0,6472	0,5935	0,4462	0,5555
7		Неостывшее	0,6420	0,5935	0,4462	0,5540
8		Холодное	0,5923	0,5935	0,1065	0,3345
9	ПГУ-427 Лукомльская ГРЭС	Горячее	0,6340	0,5935	0,3584	0,5128
10		Неостывшее	0,6250	0,5935	0,3584	0,5104
11		Холодное	0,5529	0,5935	0,0580	0,2670

Из этого следует, что наибольшее значение обобщенной функции желательности получено в первом, шестом и седьмом опытах ($D_1 = 0,5699$; $D_6 = 0,5555$; $D_7 = 0,5540$), что соответствует привлечению к работе в пиковой части графика электрических нагрузок пиково-резервных энергоисточников на базе газовых турбин Siemens типа SGT-800 [20, 21] (при работе на природном газе); хороший результат при решении задачи синтеза надежности и экономичности также показал парогазовый энергоблок мощностью 427 МВт Березовской ГРЭС (при работе на природном газе и ежедневных пусках из горячего или неостывшего состояний).

ВЫВОДЫ

1. Решение проблемы оптимизации надежности и экономичности в данных исследованиях осуществляется путем выбора рационального соотношения и взаимовлияния между надежностью и экономичностью производства электроэнергии при участии энергоблоков ТЭС в регулировании суточного графика нагрузок.

2. В связи с корректировкой состава находящегося в работе оборудования электростанций и режимов его эксплуатации (включение в работу электрокотлов, пиково-резервных энергоисточников, перераспределение величины теплофикационной и конденсационной выработки электроэнергии) при интеграции Белорусской АЭС в объединенную энергосистему необходимо проводить анализ возможности глубокой разгрузки и работы в режимах ежесуточного отключения в резерв оборудования 12 основных электростанций энергосистемы с учетом экономичной, длительной и надежной работы оборудования на данных режимах.

3. Предложенная методика на основе обобщенной функции желательности является эффективным средством при анализе пригодности оборудования к привлечению для работы в требуемых режимах эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богдан, Е. В. Прогнозируемые нагрузки электростанций Белорусской энергосистемы после ввода Белорусской АЭС / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Актуальные проблемы развития энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий: материалы респ. науч.-практ. конф., 23–24 сентября 2022 г., Респ. Узбекистан, г. Карши. Qarshi Muhandislik-Iqtisodiyot Instituti, 2022. С. 536–539.
2. Богдан, Е. В. Типовой баланс мощности энергосистемы после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС [Электронный ресурс] / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика Беларуси-2022: материалы респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2022. С. 49–53. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/121698>.
3. Романюк, В. Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2016. № 4 (91). С. 2–9.
4. Богдан, Е. В. Оценка существующих условий работы ТЭЦ Белорусской энергосистемы / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Современные технологии и экономика в энергетике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 27 апреля 2022 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 171–173.
5. Богдан, Е. В. Проблемы регулирования суточного графика электрических нагрузок энергосистемы Республики Беларусь и интегрированной АЭС / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика и автоматизация в современном обществе: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. обучающихся и преподавателей / под общ. ред. Т. Ю. Коротковой. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. Ч. 2. С. 30–36.
6. Богдан, Е. В. К вопросу регулирования суточного графика электрических нагрузок после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС [Электронный ресурс] / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика Беларуси-2021: материалы респ. науч.-практ. конф., 26 мая 2021 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2021. С. 175–180. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/98973>.
7. Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>.
8. Карницкий, Н. Б. Решение задач синтеза надежности с помощью мультипликативных критериев оптимальности паровых турбин / Н. Б. Карницкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2001. № 3. С. 115–119. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2001-0-3-115-119>.
9. Математическое моделирование как инструмент анализа показателей надежности и экономичности автоматизированного теплоэнергетического оборудования ТЭС / Г. Т. Кулаков [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2017. № 1 (94). С. 2–7.
10. Harrington, E. C. The Desirability Function / E. C. Harrington // Industrial Quality Control. 1965. Vol. 21, No 10. P. 494–498.
11. Рузинов, Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов / Л. П. Рузинов. М.: Химия, 1972. 200 с.
12. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: Учеб. пособие для химико-технологических вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. М.: Высш. шк., 1978. 319 с.
13. Богдан, Е. В. Современные тенденции повышения надежности и экономичности работы тепловых электростанций / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // XXV Республиканский кон-

- курс научных работ студентов: сб. ст. лауреатов и авторов науч. работ, получивших первую категорию. Минск, 2018. С. 103–104.
14. Запасник, В. А. Резервирование электрической нагрузки белорусской энергосистемы за счет ТЭЦ при пуске АЭС [Электронный ресурс] / В. А. Запасник; науч. рук.: Н. Б. Карницкий, П. Н. Коробец // Актуальные проблемы энергетики: материалы 75-й науч.-техн. конф. студ. и асп.: секция «Теплоэнергетика» / сост. Т. Е. Журавская. Минск: БНТУ, 2019. С. 32–36. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/61455>.
 15. Карницкий, Н. Б. Регулирование частоты в энергосистеме после ввода БелАЭС с применением электродвигателей и аккумуляторов теплоты на примере Гродненской ТЭЦ-2 / Н. Б. Карницкий, П. Н. Коробец // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: седьмая Междунар. науч.-техн. конф., Ульяновск, 21–22 апреля 2017 г.: в 2 т. / науч. ред. В. И. Шарапов. Ульяновск: Ульяновский ГТУ, 2017. Т. 1. С. 203–207.
 16. Коробец, П. Н. Привлечение ТЭЦ к регулированию частоты, связанное с пуском Белорусской АЭС / П. Н. Коробец, В. В. Словик, Н. Б. Карницкий // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11, № 3. С. 241–246. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-241-246>.
 17. Богдан, Е. В. Оценка изменения межинспекционного периода парогазовых энергоблоков при работе в режимах частых пуско-остановов [Электронный ресурс] / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергостарт. Материалы IV всерос. молодежной науч.-практ. конф., 18–20 ноября 2021 г., Кемерово, 2021. Режим доступа: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energostart/2021/energostart/pages/Articles/113.pdf>.
 18. Богдан, Е. В., Дубровенский, А. Н. Оптимизация распределения нагрузок в энергосистеме с учетом технических особенностей теплофикационных турбин / Е. В. Богдан, А. Н. Дубровенский // Энергетическая стратегия. 2021. № 5 (83). С. 47–52.
 19. Богдан, Е. В. Перспективы применения ПГУ в Беларуси в условиях ввода АЭС / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы IV всерос. науч.-практ. конф., 19–21 декабря 2018 г., Кемерово. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т имени Т. Ф. Горбачева, 2018. С. 110–114.
 20. Богдан, Е. В. Пиковые резервные энергетические источники на базе газовых турбин и их роль в регулировании нагрузки энергосистемы Беларуси / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Современные технологии и экономика в энергетике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 27 апреля 2023 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. С. 107–109.
 21. Богдан, Е. В. Характерные режимы работы пиково-резервных энергоисточников на базе ГТУ, принятых к установке в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика Беларуси-2023: материалы респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2023 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2023. С. 99–103. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/135678>.

Поступила 24.08.2023 Подписана в печать 27.10.2023 Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Bogdan E. V., Karnitsky N. B. (2022) Projected Loads of Power Plants of the Belarusian Power System after Commissioning of the Belarusian NPP. *Aktual'nye Problemy Razvitiya Energo- i Resursosberegayushchikh Innovatsionnykh Tekhnologii: Materialy Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 23–24 Sentyabrya 2022 g., Resp. Uzbekistan, g. Karshi* [Actual Problems of Development of Energy- and Resource-Saving Innovative Technologies: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, September 23–24, 2022, Republic of Uzbekistan, Karshi]. Karshi, Karshi Engineering and Economic Institute, 536–539 (in Russian).
2. Bogdan E. V., Karnitsky N. B. (2022) Typical Power Balance of the Power System after Commissioning of the Belarusian NPP. *Energetika Belarusi-2022: Materialy Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 25–26 Maya 2022 g.* [Power Engineering of Belarus-2022: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, May 25–26, 2022]. Minsk, BNTU, 2022, 49–53. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/121698> (in Russian).

3. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Assessment of the Thermodynamic Efficiency of the Functioning of the Belarusian Energy System in the Conditions of Operation of the Belarusian NPP. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 2–9 (in Russian).
4. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. Assessment of the Existing Conditions of CHP Operation of the Belarusian Power System. *Sovremennye Tekhnologii i Ekonomika v Energetike: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 27 Aprelya 2023 g.* [Modern Technologies and Economics in Energy: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 27, 2023]. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS Publ., 171–173 (in Russian).
5. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2021) Problems of Regulation of the Daily Schedule of Electrical Loads of the Power System of the Republic of Belarus and the Integrated NPP. *Energetika i Avtomatizatsiya v Sovremennom Obshchestve: Materialy IV Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. Obuchayushchikhsya i Prepodavatelei. Ch. 2* [Energy and Automation in Modern Society. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference of Students and Teachers. Part 2.] St. Petersburg, SPbSUITD, 30–36 (in Russian).
6. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2021) Towards the Issue of Regulating the Daily Schedule of Electric Loads after Commissioning of the Belarusian NPP. *Energetika Belarusi-2021: Materialy Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 26 Maya 2021 g.* [Energy of Belarus-2021: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, May 26, 2021]. Minsk, BNTU, 175–180. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/98973> (in Russian).
7. Mikhalevich A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking Into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian).
8. Karnitskiy N. B. (2001) Solving Problems of Reliability Synthesis Using Multiplicative Optimality Criteria for Steam Turbines *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 115–119. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2001-0-3-115-119> (in Russian).
9. Kulakov G. T., Kravchenko V. V., Karnitskiy N. B., Kukhorenko A. N. (2017) Mathematical Modeling as a Tool for Analyzing Reliability and Efficiency Indicators of Automated Thermal Power Plant Equipment. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (1), 2–7 (in Russian).
10. Harrington E. C. (1965) The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21 (10), 494–498.
11. Ruzinov L. P. *Statistical Methods of Optimization of Chemical Processes*. Moscow, Khimiya Publ. 200 (in Russian).
12. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. (1978) *Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 319 (in Russian).
13. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. Modern Trends in Improving the Reliability and Efficiency of Thermal Power Plants. *XXV Respublikanskii Konkurs Nauchnykh Rabot Studentov: Sb. St. Laureatov i Avtorov Nauch. Rabot, Poluchivshikh Pervuyu Kategoriyu* [XXV Republican Contest of Scientific Projects of Students. A Collection of Articles by Laureates and Authors of Scientific Papers that Were Qualified as the First Category]. Minsk, 103–104 (in Russian).
14. Zapasnik V. A. (2019) Reservation of the Electric Load of the Belarusian Power System at the Expense of the CHP at the Launch of the NPP. *Aktual'nye Problemy Energetiki: Materialy 75th Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov: Sektsiya Teploenergetika* [Actual Problems of Energy: Proceedings of the 75th Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates: Heat Power Engineering Section]. Minsk, BNTU, 32–36. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/61455> (in Russian).
15. Karnitskiy N. B., Korobets P. N. (2017) Frequency Regulation in the Power System after Commissioning of the Belarusian NPP with the Use of Electric Boilers and Heat Accumulators on the Example of the Grodno CHPP-2. *Energoberezhenie v Gorodskom Khozyaistve, Energetike, Promyshlennosti: Sed'maya Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Ul'yanovsk, 21–22 Aprelya 2017 g. T. 1* [Energy Saving in Urban Economy, Energy, Industry: the Seventh Interna-

- tional Scientific and Technical Conference, Ulyanovsk, April 21–22, 2017. Vol. 1]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 203–207 (in Russian).
16. Korobets P. N., Slovik V. V., Karnitskiy N. B. (2018) Having CHPP Involved in Frequency Control Related to Starting Belarusian NPP. *Safety and Reliability of Power Industry*. 11 (3), 241–246. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-241-246> (in Russian).
17. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2021) Assessment of Changes of the Inter-Inspection Period of Combined-Cycle Power Units when Operating in Frequent Start-Stop Modes. *Energostart. Materialy IV Vseros. Molodezhnoi Nauch.-Prakt. Konf., 18–20 Noyabrya 2021 g., Kemerovo* [Energostart. Materials of the IV All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, November 18–20, 2021, Kemerovo]. Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. Available at: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energostart/2021/energostart/pages/Articles/113.pdf> (in Russian).
18. Bogdan E. V., Dubrovenskii A. N. (2021) Optimization of Load Distribution in the Power System Taking Into Account the Technical Features of Heating Turbines. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (5), 47–52 (in Russian).
19. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2018) Prospects for the Use of CCGT in Belarus in the Conditions of NPP Commissioning. *Energetika i Energoberezhenie: Teoriya i Praktika: Materialy IV Vseros. Nauch.-Prakt. Konf., 19–21 Dekabrya 2018. Kemerovo* [Energy and Energy Saving: Theory and Practice: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference. December 19–21, 2018, Kemerovo] Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 110–114 (in Russian).
20. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2023) Peak Reserve Energy Sources Based on Gas Turbines and Their Role in Regulating the Load of the Power System of Belarus. *Sovremennye Tekhnologii i Ekonomika v Energetike: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 27 Aprelya 2023 g.* [Modern Technologies and Economics in Energy: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 27, 2023]. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS Publ., 107–109 (in Russian).
21. Bogdan E. V., Karnitskiy N. B. (2023) Characteristic Modes of Operation of Peak-Reserve Power Sources at the Base of Gas Turbine Unit Accepted for Installing in the Republic of Belarus. *Energetika Belarusi-2023: Materialy Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 25–26 Maya 2022 g.* [Power Engineering of Belarus-2023: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, May 25–26, 2023]. Minsk, BNTU, 99–103. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/135678>.

Received: 24 August 2023

Accepted: 27 October 2023

Published online: 30 November 2023