

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56>

УДК 621.311.22

Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси

Часть 1

В. Н. Романюк¹⁾, А. А. Бобич¹⁾, Т. В. Рыжова¹⁾, Т. В. Бубырь¹⁾,
В. В. Янчук¹⁾, Я. С. Яцухно¹⁾

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

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

Реферат. Энергосистема – одна из основ современного государства, и необходимость ее успешного развития и функционирования не подлежит сомнению. В этой связи актуален ее объективный анализ на базе комплекса показателей: экономических, энергетических и термодинамических. Вместе с тем традиционная оценка работы энергосистемы осуществляется на основе таких характеристик, как удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск тепловой энергии, что не дает полной картины и не всегда применяется корректно. В настоящей статье впервые на базе эксергетического метода рассматривается расчет эксергетического коэффициента полезного действия. Данный показатель позволяет наиболее простым способом получить объективную оценку термодинамической эффективности такого сложного формирования, как энергосистема современной страны. В качестве примера проанализированы Объединенная энергетическая система Беларуси в целом и конденсационные электростанции в частности за достаточно продолжительный срок (2000–2021) и в различные характерные периоды времени. Описана методика расчета эксергетического коэффициента полезного действия. Полученные результаты представлены в графическом виде. Уделено внимание вопросу приемлемости погрешности при обобщении данных об исходных потоках первичных энергоресурсов и продуктовых потоках централизованных генерирующих источников энергосистемы. Проанализирован вклад конденсационных электростанций в общий объем генерации электроэнергии, определены наиболее совершенные из них с термодинамической точки зрения. Проведен расчет их энергетических и эксергетических показателей, рассмотрены изменения, связанные с вводом Белорусской АЭС. Делается вывод о целесообразности дальнейшей реконструкции энергоисточников энергосистемы с целью снижения относительного веса природного газа в приходной части энергобаланса до 50 %. Достичь этого можно путем повышения термодинамической эффективности.

Ключевые слова: энергосистема, эксергия, эксергетический КПД, термодинамическая эффективность, анализ, конденсационные электростанции, Белорусская АЭС

Для цитирования: Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Часть 1 / В. Н. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 44–56. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System

Part 1

V. N. Romaniuk¹⁾, A. A. Bobich¹⁾, T. N. Ryzhova¹⁾, T. V. Buby¹⁾,
V. V. Yanchuk¹⁾, Y. S. Yatsukhna¹⁾

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

Abstract. The energy system is one of the foundations of a modern state, so, the need for its successful development and functioning is beyond doubt. In this regard, an objective assessment based on a set of indicators (viz. economic, energy and thermodynamic) is relevant. However, the traditional assessment of the operation of the energy system is carried out on the basis of such characteristics as the specific consumption of conventional fuel for electricity generation and heat release, which does not provide a comprehensive picture and is not always applied correctly. In this article, for the first time on the basis of the exergetic method, the calculation of the exergetic efficiency is considered. The use of this indicator makes it possible to obtain an objective assessment of the thermodynamic efficiency of such a complex formation as the energy system of a modern country in the easiest way. As an example, the unified energy system of Belarus in general and condensing power plants in particular have been analyzed for a fairly long period (2000–2021) and in various characteristic time periods. The method of calculating the exergetic efficiency is described. The results obtained are presented graphically. Attention is paid to the issue of the acceptability of the error when generalizing data on the initial flows of primary energy resources and product flows of centralized generating sources of the energy system. The contribution of condensing power plants to the total volume of electricity generation is analyzed, the most advanced of them are determined from a thermodynamic point of view. The calculation of their energy and exergetic indicators was carried out; the changes associated with the commissioning of the Belarusian NPP were considered. The conclusion is made that further reconstruction of energy sources of the power system in order to reduce the relative weight of natural gas in the incoming part of the energy balance to 50 % is expedient. This can be achieved by increasing the thermodynamic efficiency.

Keywords: energy system, exergy, exergetic efficiency, thermodynamic efficiency, analysis, condensing power plants, Belarusian NPP

For citation: Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. N., Buby T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 44–56. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56> (in Russian)

Введение

Энергетическую эффективность теплоэнергетических систем принято оценивать по удельному расходу условного топлива на производство преобразованных энергопотоков – электрической и тепловой энергии. Этот показатель традиционен и достаточно удобен для энергетических систем с однородным оборудованием, когда в качестве первичного энергоресурса используется только органическое топливо. Если же в системе имеются источники раздельной генерации электрической и тепловой энергии, а также комбинированного производства преобразованных энергопотоков и при этом применяются различные первичные энергоресурсы (органиче-

ское и ядерное топливо, альтернативные источники энергии, побочные энергоресурсы, органические отходы промышленного и сельскохозяйственного производства), оценка таких сложных энергосистем по удельному расходу условного топлива теряет однозначность. Тогда требуется более универсальный индикатор энергетической эффективности. В этом качестве можно использовать термодинамические потенциалы, обладающие чрезвычайно важным свойством идентификации вида работы (механической, электрической и других видов в тех или иных условиях) [1, 2]. Целесообразность такого индикатора в технических приложениях отмечал еще академик В. И. Вернадский [3].

В [4] проанализированы методики оценки и термодинамической оптимизации технических систем преобразования энергии на базе эксергетических показателей, а также вопросы сравнения эффективности систем комбинированной и раздельной выработки преобразованных энергопотоков с помощью эксергетического метода. Вместе с тем информации о применении соответствующих показателей на основе эксергетического метода оценки для больших энергетических систем с многоукладной структурой в общедоступной литературе нами не найдено. При этом следует отметить, что для отдельных технических систем методика эксергетического анализа достаточно хорошо отработана [2, 4–11].

Методика оценки термодинамической эффективности энергосистемы

Согласно [12–14], эффективность энергосистемы можно определить с помощью термодинамического анализа на базе эксергетического метода по таким показателям, как: термодинамический коэффициент полезного действия, степень термодинамического, технологического и полного совершенства технической системы.

Термодинамический КПД используется для детального анализа технической системы обычно в тех случаях, когда имеются потоки транзитной эксергии, значительно превышающие потоки эксергии, характеризующие процессы, протекающие в исследуемой технической системе, и определяется как

$$\eta = (\sum E'' - E^{tr}) / (\sum E' - E^{tr}) = 1 - \sum D / (\sum E' - E^{tr}) = E_{исп} / E_{расп}, \quad (1)$$

где $\sum E'$, $\sum E''$ – потоки эксергии соответственно на входе и выходе системы, ГВт·ч; E^{tr} – транзитные потоки эксергии, ГВт·ч; $E_{исп}$, $E_{расп}$ – используемый и располагаемый потоки эксергии соответственно, ГВт·ч; $\sum D$ – потери эксергии, ГВт·ч.

Для теплотехнологических процессов более информативна оценка термодинамической эффективности системы по степени технологического совершенства

$$\beta = \sum E_{\text{расп}} / \sum E' = 1 - \sum E^{tr} / \sum E'. \quad (2)$$

Степень полного совершенства находят по выражению

$$\mu = \sum E_{\text{исп}} / \sum E' = 1 - (\sum E^{tr} + \sum D) / \sum E'. \quad (3)$$

Степень термодинамического совершенства определяют как

$$\nu = \sum E'' / \sum E'. \quad (4)$$

Очевидна полезность всего приведенного набора показателей в зависимости от индивидуальных особенностей теплотехнологических систем. Для интегральной оценки разнородных систем преобразования энергии может применяться эксергетический КПД, т. е. степень термодинамического совершенства (4).

При количественной оценке степени термодинамического совершенства за выбранный период времени для системы комбинированной выработки энергопотоков соотношение (4) записывается в виде эксергетического КПД

$$\eta_e = (\sum W_3 + \sum E''_{qp} + \sum E''_{qcv}) / \sum E'_{t-vo}, \quad (5)$$

где $\sum W_3$ – потоки электроэнергии, отпущенные внешним потребителям, ГВт·ч; $\sum E''_{qp}$, $\sum E''_{qcv}$ – эксергии потоков теплоты, отпущенной внешним потребителям, соответственно с паром и сетевой водой, ГВт·ч; $\sum E'_{t-vo}$ – эксергии потоков топлив, потребляемых источниками энергосистемы, ГВт·ч.

Эксергия потоков теплоты E''_q , ГВт·ч, с паровым ($\sum E''_{qp}$) или водяным ($\sum E''_{qcv}$) теплоносителем

$$E''_q = Q\tau_e = Q(1 - T_0/T), \quad (6)$$

где Q – теплота, отпущенная с теплоносителем, ГВт·ч; τ_e – эксергетическая температурная функция; T_0 – температура окружающей среды, К; T – то же отпускаемых теплоносителей, К.

Температура отпускаемых сетевой воды и пара не одинаковая, но диапазон различий невелик, как и абсолютные значения температуры этих теплоносителей. В этом случае эксергетическая температурная функция изменяется незначительно. Следовательно, погрешностью определения эксергии отпускаемых тепловых потоков можно пренебречь, поскольку ее величина оказывается меньше погрешности имеющихся исходных характеристик и расходов.

Для определения эксергии топлива E' , ГВт·ч, в [2, 4–6] предлагается ряд соотношений:

для природного газа

$$E'_{\text{нг}} = e_0 B = 1,04 Q_p^B B; \quad (7)$$

для жидких топлив

$$E'_{\text{жт}} = 0,975 Q_p^B B; \quad (8)$$

для твердых топлив

$$E'_{\text{тт}} = Q_p^B (1 - W_{\text{вл}}) B, \quad (9)$$

где e_0 – удельная эксергия, ГДж/кг; Q_p^B – высшая теплота сгорания, ГДж/кг; B – расход топлива, кг; $W_{\text{вл}}$ – влажность твердого топлива, доли.

Для расчета эксергии ядерного топлива предлагается соотношение, кДж/с [3]:

$$E'_{\text{ят}} = 5,354 \cdot 10^9 (B_{\text{ят}} / \mu), \quad (10)$$

где $B_{\text{ят}}$ – расход расщепляющегося изотопа ядерного топлива, загружаемого в реактор, кг/ч; μ – молярный вес расщепляющегося изотопа, кг/кмоль.

В силу объективных причин химическая эксергия, характеризующая эксергию топлив, определяется с той или иной погрешностью [4].

Использование эксергетического КПД позволяет более полно оценивать варианты развития энергосистемы при привлечении различных видов топлива, включая возобновляемые источники энергии и органические отходы производства. Кроме того, с помощью методов термодинамического анализа можно исследовать эффективность преобразования энергии внутри технической системы, что важно для комплексного изучения энергетических систем.

Расчет эксергетического коэффициента полезного действия

Эксергетический КПД Объединенной энергетической системы (ОЭС) Беларуси рассчитан за 2000–2021 гг. на основе годовых статистических отчетов. На рис. 1 динамика изменения эксергетического КПД приведена на фоне используемых для оценки работы энергетического оборудования данных по традиционным характеристикам: $УРТ_3$ – удельный расход топлива на производство электроэнергии, г/(кВт·ч); $УРТ_т$ – то же на производство тепловой энергии, кг/Гкал.

Увеличение эксергетического КПД с 29,4 до 34,0 % (рис. 1) обусловлено техническим перевооружением ОЭС, и в первую очередь внедрением высокоэффективных парогазовых технологий на конденсационных электростанциях (КЭС) и теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). Так, в 2009–2017 гг. введены парогазовые блоки на Минской ТЭЦ-3, Лидской ТЭЦ, Гродненской ТЭЦ-2, Борисовской ТЭЦ, Могилевской ТЭЦ-1, Гомельской ТЭЦ-1,

а также мощные парогазовые установки ПГУ-400 на Минской ТЭЦ-5, Березовской и Лукомльской ГРЭС. Динамика предложенного индикатора хорошо коррелирует с динамикой изменения традиционных характеристик – удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии и отпуска тепловой энергии. Однако для представительности сравнения энергетической эффективности ТЭЦ по двум энергетическим показателям (удельному расходу топлива на производство тепловой и электрической энергии) следует один из них зафиксировать на определенном уровне, тогда изменение оставшегося позволит получить более объективную оценку.

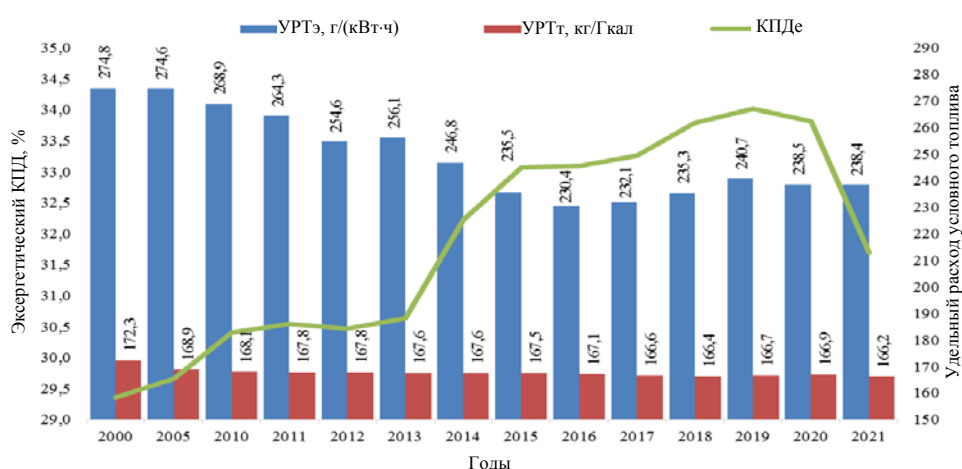


Рис. 1. Изменение энергетических и термодинамических показателей работы энергосистемы Беларуси в 2000–2021 гг.

Fig. 1. Alterations in the energy and thermodynamic performance of the Belarusian energy system in 2000–2021

С вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС термодинамическая эффективность ОЭС Беларуси в 2021 г. снизилась на 1,4 % и составила 32,5 %, что ожидаемо, исходя из характеристик электроисточников. Однако экономически это целесообразно, поскольку АЭС вытесняет из оборота более дорогой вид топлива – природный газ. Вместе с тем снижение термодинамической эффективности энергосистемы указывает на необходимость ее дальнейшего развития для восстановления значения этого объективного индикативного показателя.

Общие сведения о конденсационных электростанциях Беларуси

В ОЭС Беларуси эксплуатируются три КЭС на органическом топливе (Березовская и Лукомльская ГРЭС, Минская ТЭЦ-5) и одна на ядерном топливе (Белорусская АЭС). Установленная электрическая мощность основного оборудования КЭС на органическом топливе на конец 2021 г. и его средняя загрузка по периодам года приведены в табл. 1.

Таблица 1

Установленная электрическая мощность и средняя загрузка основного оборудования конденсационных электростанций на конец 2021 г.

Installed electric capacity and average load of the main equipment of condensing power plants at the end of 2021

Наименование источника	Мощность, МВт		
	установленная электрическая	средняя, отопительный период	средняя, межотопительный период
Березовская ГРЭС			
Блок № 1	160	457	535
Блок № 3 (сб. схема)	$165 + 2 \cdot 25 = 215$		
Блок № 4 (сб. схема)	$165 + 2 \cdot 25 = 215$		
Блок № 5	$180 + 2 \cdot 29 = 238$		
Блок № 7 (ПГУ-400)	427		
Итого по Березовской ГРЭС	1255		
Лукомльская ГРЭС			
Блок № 1	315	924	1389
Блок № 2	315		
Блок № 3	315		
Блок № 4	315		
Блок № 5	300		
Блок № 6	300		
Блок № 7	300		
Блок № 8	300		
Блок № 9 (ПГУ-400)	427		
Итого по Лукомльской ГРЭС	2887		
Минская ТЭЦ-5			
Блок № 1	320	148	239
Блок № 2 (ПГУ-400)	400		
Итого по Минской ТЭЦ-5	720		
Итого по КЭС	4862	1529	2163

На проанализированных КЭС (табл. 1) имеются парогазовые установки, удельный вес которых в установленной мощности: для Лукомльской ГРЭС – 15 %, Березовской ГРЭС – 34 %, Минской ТЭЦ-5 – 55 %, или 26 % (1254 МВт) суммарной установленной мощности всех КЭС (4862 МВт). Указанными источниками в 2021 г. произведено 60 % всей отпускаемой электроэнергии, 73 % в межотопительный период и 52 % в отопительный (рис. 2). Поэтому целесообразно провести оценку термодинамической эффективности их работы.

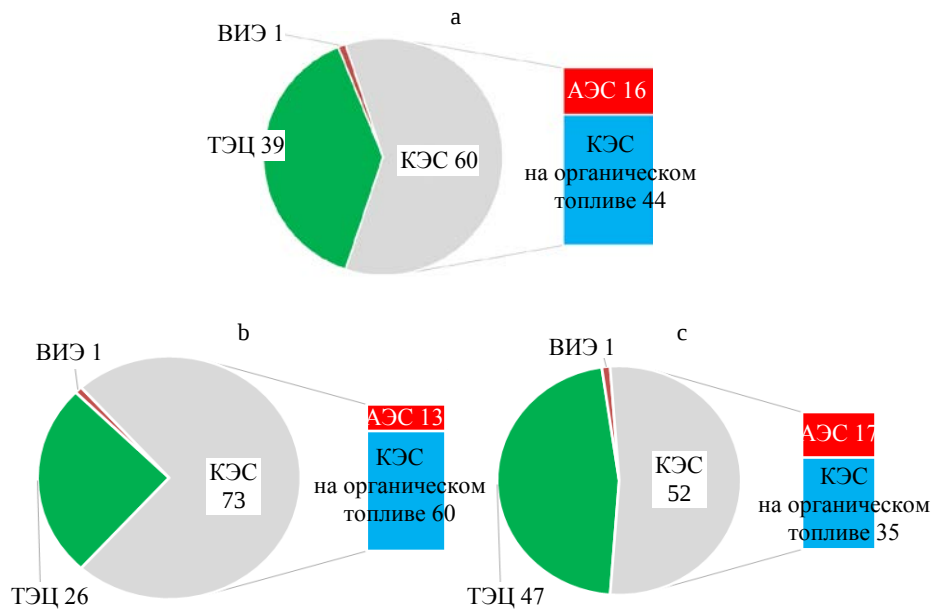


Рис. 2. Отпуск электроэнергии генерирующими источниками в 2021 г., %:
а – годовой; б – в межотопительный период; с – в отопительный период

Fig. 2. Electricity supply by generating sources in 2021, %:
a – the annual one; b – during the inter-heating period; c – during the heating period

Показатели работы КЭС приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Генерация электроэнергии
конденсационными электростанциями в 2021 г.
Generation of electricity by condensing power plants in 2021

Наименование электростанции	Генерация электроэнергии, млрд кВт·ч			Установленная электрическая мощность, ГВт	Коэффициент использования установленной электрической мощности, %		
	годо- вая	отопи- тельный период	межото- пительный период		годо- вой	отопи- тельный период	межото- пительный период
Березовская ГРЭС	4,29	2,33	1,96	1,26	39	36	43
Лукомльская ГРЭС	9,80	4,70	5,10	2,89	39	32	48
Минская ТЭЦ-5	1,63	0,75	0,88	0,72	26	21	33
Итого по КЭС на органическом топливе	15,70	7,80	7,90	4,87	37	31	44
Белорусская АЭС	5,78	4,00	1,78	1,19	55	66	41
ИТОГО	21,50	11,80	9,73	6,06	41	38	44

Таблица 3

**Потребление условного топлива и отпуск электроэнергии
конденсационными электростанциями в 2021 г.**

**Conventional fuel consumption and electricity supply
by condensing power plants in 2021**

Наименование электростанции	Потребление условного топлива, млн т у.т.			Отпуск электроэнергии, млрд кВт·ч			Удельный расход условного топлива на отпуск электро- энергии, г/(кВт·ч)		
	годо- вое	отопи- тельный период	межото- питель- ный период	годо- вой	отопи- тельный период	межото- питель- ный период	годо- вой	отопи- тельный период	межото- питель- ный период
Березовская ГРЭС	1,12	0,62	0,50	4,16	2,25	1,91	269	274	263
Лукомльская ГРЭС	2,84	1,36	1,48	9,47	4,54	4,93	300	298	302
Минская ТЭЦ-5	0,40	0,20	0,20	1,58	0,73	0,85	253	273	237
Итого по КЭС на органическом топливе	4,36	2,17	2,19	15,20	7,50	7,70	287	289	285
Белорусская АЭС	1,95	1,35	0,60	5,40	3,73	1,67	362	362	362

Отпускаемый поток электроэнергии и поток мощности КЭС за 2021 г. приведены на рис. 3.

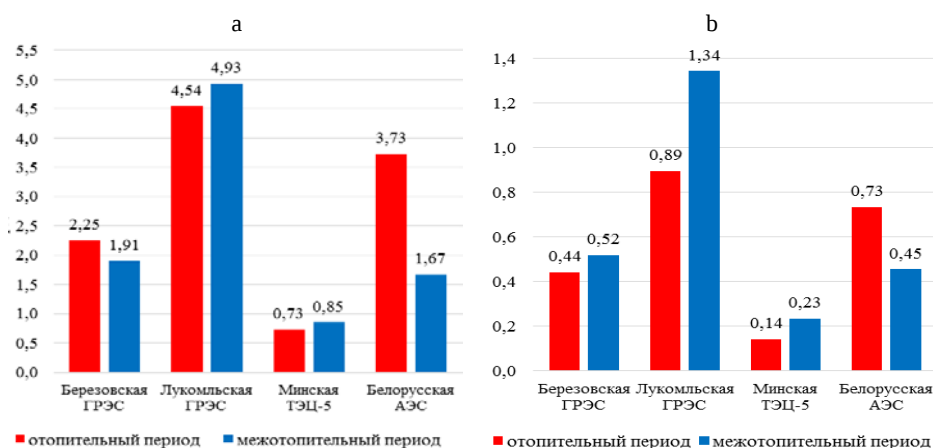


Рис. 3. Отпускаемые потоки электроэнергии (а) и мощности (б) за 2021 г.

Fig. 3. Supplied electricity flows (a) and capacity (b) for the periods of 2021

Доля отдельных КЭС в годовом отпуске вырабатываемой ими электроэнергии за 2021 г. приведена на рис. 4.

Анализ загрузки КЭС за 2021 г. показывает (табл. 2), что средний коэффициент использования установленной электрической мощности 41 %, что соответствует 3,6 тыс. ч работы в году с номинальной мощностью.

При этом использование электрических мощностей на Белорусской АЭС составляет 55 %, что значительно выше среднего уровня, а на Минской ТЭЦ-5 – 26 %, т. е. ниже среднего уровня. Одним из факторов, определяющих дальнейшую целесообразность эксплуатации оборудования, является его износ, который в ряде случаев достиг предельной величины.

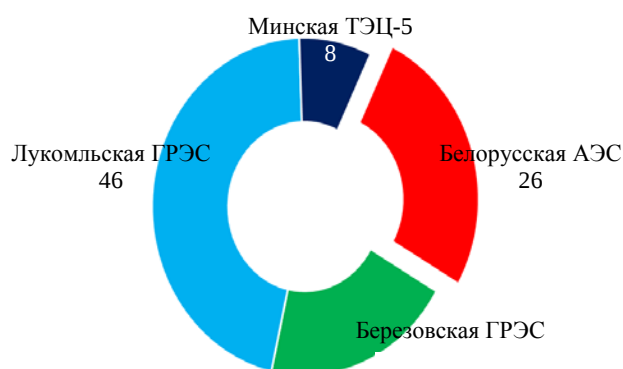


Рис. 4. Доля конденсационных электростанций в годовом отпуске электроэнергии в 2021 г., %

Fig. 4. The share of condensing power plants in annual electricity supply in 2021, %

Оценка термодинамической эффективности конденсационных электростанций

Ранжирование КЭС по величине эксергетического КПД от большего к меньшему за 2021 г., за отопительный и межотопительный периоды приведено на рис. 5. Максимальный эксергетический КПД имеет место на Минской ТЭЦ-5, что связано с наибольшим удельным весом ее ПГУ в генерации электроэнергии.

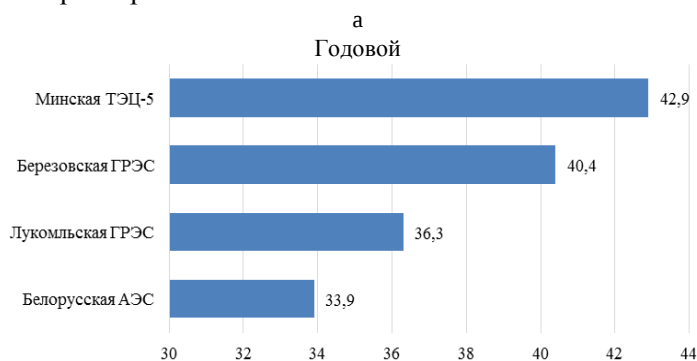


Рис. 5. Эксергетический коэффициент полезного действия конденсационных электростанций за 2021 г., %: а – годовой; б – за отопительный период; с – за межотопительный период (окончание рис. на с. 54)

Fig. 5. Exergetic efficiency of condensing power plants for 2021, %: a – the annual one; b – for the heating period; c – for the inter-heating period (ending of the Fig. is on p. 54)

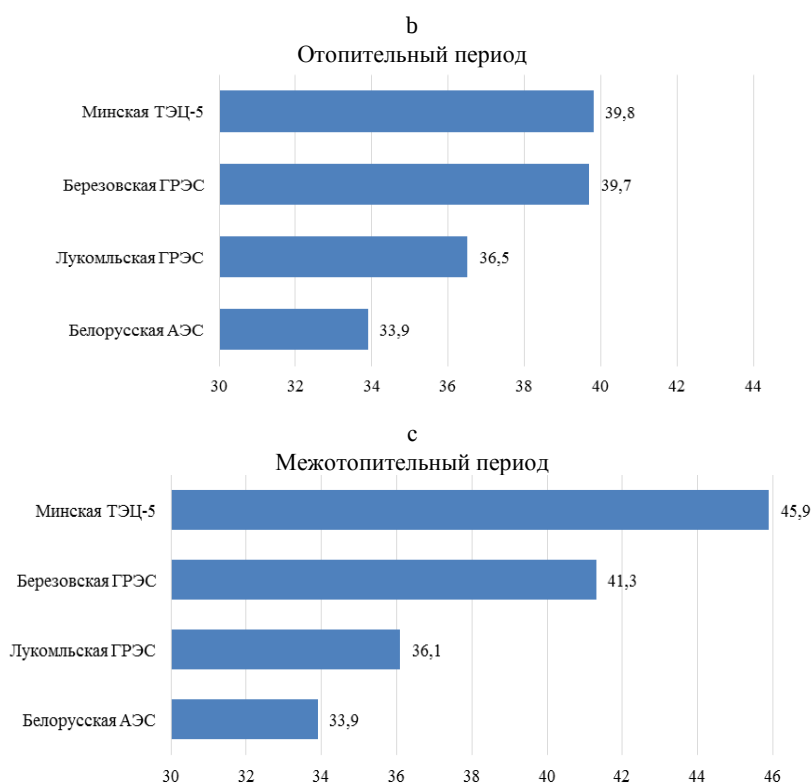


Рис. 5. Окончание
Fig. 5. Ending

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена целесообразность внедрения в практику оценки энергисточников эксергетического коэффициента полезного действия, являющегося объективной индикативной характеристикой термодинамической эффективности технической системы.

2. Эксергетический коэффициент полезного действия конденсационных электростанций изменяется в широком диапазоне от 33,9 до 45,9 %, что связано с режимами работы оборудования в отопительный и межотопительный периоды. Наивысшую термодинамическую эффективность имеет Минская ТЭЦ-5 с максимальным удельным весом генерации на совершенных парогазовых установках.

3. У конденсационных электростанций термодинамическая эффективность выше среднего показателя по энергосистеме, так как они производят единственный и наиболее ценный продукт – электроэнергию.

4. Снижение термодинамической эффективности указывает на необходимость дальнейшего развития энергосистемы. Это важно для уменьшения потребления природного газа, доля которого с вводом Белорус-

ской АЭС снижается с 97 до 59 % [15], но при этом превышает порог 50 %, установленный в соответствии с критерием энергетической безопасности [15, 16].

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / Е. О. Воронов [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2016. № 3 (90). С. 2–7.
2. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
3. Вернадский, В. И. О задачах и организации прикладной научной работы АН СССР / В. М. Бродянский. Л.: Изд-во АН СССР, 1928. 42 с.
4. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 273 с.
5. Сажин, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. М.: Химия, 1992. 208 с.
6. Сорин, М. В. Методика однозначного определения эксергетического КПД технических систем преобразования энергии и вещества / М. В. Сорин, В. М. Бродянский // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Энергетика. 1985. № 3. С. 78–88.
7. Kriese, S. Exergie in der Kraftwerkstechnik. Leistungskraft-Dampfkraftwerke-Gasturbinen-Wärme-Kraft-Kopplung / S. Kriese. Essen: Vulkan. 1971. 148 с.
8. Mujanovic, R. Bila s Parnog Bloka po Drugom Zakonu Termodinamike // R. Mujanovic // Termotechnika. 1977. № 3. Р. 56–67.
9. Pruschek, R. Exergetische Analyse eines Kernkraftwerkes / R. Pruschek // BWK. 1970. № 1. Р. 64–70.
10. Siegel, K. Exergieanalyse Heterogenen Leistungsreaktoren / K. Siegel // BWK. 1970. № 9. Р. 434–440.
11. 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.
12. Андриященко, А. И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А. И. Андриященко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы 4-й Рос. науч.-техн. конф., Ульяновск, 24–25 апр. 2003 г. Ульяновск, 2003. С. 12–14.
13. Бобич, А. А. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. А. Бобич. Минск, 2018. 224 с.
14. Повышение энергетической эффективности и снижение энергетической составляющей себестоимости продукции теплоэнергетических и теплотехнических производств в современных условиях / М. П. Малашенко [и др.] // Энергоэффективность. 2019. № 8. С. 8–15.
15. 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>.
16. Зорина, Т. Г. Типологизация и анализ значимости рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь с учетом интеграции Белорусской АЭС в энергосистему / Т. Г. Зорина, В. В. Панасюк, С. Г. Прусов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 385–397. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-385-397>.

REFERENCES

1. Voronov E. O., Romaniuk V. N., Sednin V. A., Bobich A. A. (2016) On the Issue of Assessing the Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 2–7 (in Russian).
2. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
3. Vernadsky V. I. (1928) *On the Tasks and Organization of Applied Scientific Work of the Academy of Sciences of the USSR* / V. M. Brodyansky. Leningrad, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 42.
4. Szargut J., Petela R. (1968) *Exergia*. Moscow, Energiya Publ. 273 (in Russian).
5. Sazhin B. S., Bulekov B.S. (1992) *Exergetic Method in Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ. 208 (in Russian).
6. Sorin M. V., Brodyanskii V. M. (1985) The Method of Unambiguous Determination of the Exergetic Efficiency of Technical Systems of Energy and Matter Conversion. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ministerstva Vysshego i Srednego Spetsial'nogo Obrazovaniya SSSR. Energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the USSR. Energy], (3), 78–88 (in Russian).
7. Kriese S. (1971) *Exergie in der Kraftwerkstechnik. Leistungskraftwerke-Dampfkraftwerke-Gasturbinen-Warme-Kraft-Kopplung*. Essen, Vulkan. 148 (in German).
8. Mujanovic R. (1977) Bila s Parnog Bloka po Drugom Zakonu Termodinamike. *Termotechnika*, (3), 56–67.
9. Pruschek R. (1970) Exergetische Analyse eines Kernkraftswerke. *BWK*, (1), 64–70 (in German).
10. Siegel K. (1970) Exergieanalyse Heterogenen Leistungsreaktoren. *BWK*, (9), 434–440 (in German).
11. 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).
12. Andryushenko A. I. (2003) Efficiency Indicators of Complex Power Supply Systems and the Relationship between Them. *Energoberezhenie v Gorodskom Khozyaistve, Energetike, Promyshlennosti: Materialy 4-i Ros. Nauch.-Tekhn. Konf., Ul'yanovsk, 24–25 Apr. 2003 g.* [Energy Saving in Urban Economy, Power Engineering, Industry: Materials of the 4th Russian Scientific and Technical Conference, Ulyanovsk, 24–25 Apr. 2003]. Ulyanovsk, 12–14 (in Russian).
13. Bobich A. A. (2016) *A Set of Energy-Saving Measures at the CHP Plant when Adapting to the Operating Conditions of the Power System with the Commissioning of the Belarusian NPP*. Minsk. 224 (in Russian).
14. Malashenko M. P., Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2019) Increasing Energy Efficiency and Reducing the Energy Component of the Cost of Production of Heat and Power Industry and Heat Engineering Industry in Modern Conditions. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (8), 8–15 (in Russian).
15. Mikhalevich A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian).
16. Zoryna T. G., Panasyuk V. V., Prusov S. G. (2022) Typologation and Analysis of the Significance of Risks and Threats to the Energy Security of the Republic of Belarus Taking into Account the Integration of Belarusian NPP in the Energy System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 385–397. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-385-397> (in Russian).