

В. А. ВОЛОЩУК, О. В. НЕКРАШЕВИЧ, С. В. ЛЮБИЦЬКИЙ**ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ БАКІВ-АКУМУЛЯТОРІВ**

В статті наведено результати ексергетичного аналізу перехідних процесів, що мають місце в роботі баків-акумуляторів. Показано доцільність врахування накопичення ексергії в контрольному об'єкті для оцінювання ексергетичних показників. Для заданих параметрів об'єкту визначено, що після включення режиму «зарядження акумулятора та споживання енергії», через неврахування накопичення ексергії похибка у розрахунку деструкції ексергії може досягати 130 %, а ексергії палива та ексергетичного ККД – 80 %.

Ключові слова: ексергетичний баланс, бак-акумулятор, перехідний процес, деструкція ексергії, ексергетичний ККД, похибка.

В. А. ВОЛОЩУК, Е. В. НЕКРАШЕВИЧ, С. В. ЛЮБИЦЬКИЙ
ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
БАКОВ-АККУМУЛЯТОРОВ

В статье приведены результаты эксергетического анализа переходных процессов, имеющих место в работе баков-аккумуляторов. Показана целесообразность учета накопления эксергии в контрольном объеме для оценки эксергетических показателей. Для заданных параметров объекта определено, что после включения режима «зарядка аккумулятора и потребления энергии», из-за неучета накопления эксергии погрешность в расчете деструкции эксергии может достигать 130 %, а эксергии топлива и эксергетического КПД – 80 %.

Ключевые слова: эксергетический баланс, бак-аккумулятор, переходный процесс, деструкция эксергии, эксергетический КПД, погрешность.

V. VOLOSHCHUK, O. NEKRASHEVYCH, S. LIUBYTSKYI
EXERGY ANALYSIS OF TRANSIENT MODES IN HOT WATER STORAGE

The paper demonstrates the importance of taking into account the accumulation of exergy in a control volume of a thermal storage during transient modes for evaluation of exergy-based parameters. The investigations are based on the exergy balance equation and mathematical model of the mode of simultaneous thermal energy addition and removal. It is found that for the specified parameters of the unit, when the exergy accumulation is not included, the error of estimation of exergy-base parameters can be large: in case of calculation of fuel of exergy and exergy efficiency this error can reach 80 %, the exergy destruction values are received with 130 % error. It is shown that these errors depend on the ratio of rates of cold and hot working fluids and decrease with increasing this ratio, but almost do not depend on the storage volumes and the initial temperatures of working fluids. Including accumulation of exergy within the control volumes during dynamic modes of thermal systems is necessary for implementation of exergy-based control strategies.

Key words: exergy balance, hot water storage, transient mode, exergy destruction, exergy efficiency, error.

Вступ

В теперішній час методи ексергетичного аналізу набувають широкого застосування в різних сферах. Дані методи в більшій мірі розроблено та апробовано в задачах обґрунтування параметрів об'єктів та систем теплоенергетики на стадії проекту. Разом з тим в останні роки з'явився інтерес до застосування цих методів для удосконалення систем автоматизованого керування, де необхідно врахувати перехідні процеси.

Технології акумуляції енергії широко використовуються в енергетиці. Зокрема, теплові акумулятори дають можливість ефективно вирішувати проблеми нерівномірності та неспівпадіння надходження та споживання енергоресурсів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] ексергетичне оцінювання так званих «низькоексергетичних» систем теплозабезпечення та охолодження будівель з урахуванням зміни режимів роботи реалізовано на основі квазі-стаціонарного підходу. Перехідні процеси, які супроводжуються акумуляцією ексергії в більшості

компонентах системи, за виключенням акумуляторів теплоти, не враховано.

Автори [3] пропонують реалізацію ексергетичного аналізу систем охолодження та обігріву багатофункціональної будівлі з урахуванням динаміки режимів роботи та можливістю удосконалення керування даного об'єкту на основі ексергетичної концепції, яка передбачає забезпечення низькотемпературних потреб енергоносіями з низькою ексергією.

Автори [4] реалізували поглиблений динамічний ексергетичний аналіз системи опалення та гарячого водопостачання будинку від двигуна Стірлінга та конденсаційного котла. В даному випадку деструкцію ексергії в кожному компоненті системи було розділено на декілька частин: ту, яку можна уникнути, якої позбутися неможливо, ту, яка залежить від ефективності даного компонента і яка залежить від взаємозв'язків між компонентами. На основі поєднання двох підходів (експериментального та аналітичного) було враховано перехідні процеси, що мають місце в компонентах системи. Отримана інформація може бути використана для діагностики та оптимізації керування системи.

© В. А. Волощук, О. В. Некрашевич, С. В. Любицький, 2020

Робота [5] пропонує новий підхід для розрахунку ендогенної (внутрішньо залежної) та екзогенної (зовнішньо залежної) частин деструкції ексергії в компонентах системи з урахуванням динамічних режимів роботи. Для системи теплота холодопостачання багатофункціональної будівлі показано, що неефективна експлуатація нижчих по ходу теплоносія компонентів спричиняє зростання деструкції ексергії у попередніх елементах (котли, тепловий насос). В дослідженнях використовувалося рівняння ексергетичного балансу з урахуванням акумуляції ексергії.

Автори [6] пропонують стратегію керування системи опалення, вентиляції та кондиціонування на основі ексергетичного підходу. Показано, що критерії ексергетичного аналізу є ефективними для створення алгоритмів та систем керування. Запропонована на основі ексергетичного підходу система керування тільки для кінцевого споживача (приміщення) без врахування всієї системи дає можливість скоротити у порівнянні із стратегією керування на основі енергетичного (ентальпійного) підходу до 13 % експлуатаційних витрат. Застосування на основі ексергетичного підходу контролера з прогнозним керуванням для об'єкту в цілому (з урахуванням джерел та систем передачі енергоносіїв) дало можливість зменшити потреби в енергоносіях на 23 % у порівнянні із прогнозним керуванням, де використовується тільки енергетичний баланс об'єкту. В роботі було використано динамічну модель ексергетичного аналізу об'єкту.

Автори [7] відзначають, що стратегія керування об'єктами теплоенергетики на основі ексергетичного підходу є одним із нових напрямків. Показано, що саме реалізація ексергетичного аналізу з урахуванням динаміки режимів роботи дає можливість ефективніше вирішувати практичні задачі створення та керування такими об'єктами. На основі проведеного літературного огляду робиться висновок, що поки що мало наукових робіт присвячено динамічному ексергетичному оцінюванню теплоенергетичних об'єктів.

В роботі [8] в якості критерію з оцінювання ефективності системи опалення, вентиляції та кондиціонування запропоновано використати де-

$$E_D(t) = \sum_{in, q_{in}} Q_{q_{in}}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_0(t)}{T_{q_{in}}(t)}\right) - \sum_{out, q_{out}} Q_{q_{out}}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_0(t)}{T_{q_{out}}(t)}\right) + \sum_{in, w_{in}} W_{cv, w_{in}}(t) - \sum_{out, w_{out}} W_{cv, w_{out}}(t) + \sum_i E_{in, i}(t) - \sum_j E_{out, j}(t) - \frac{dE_{cv}(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $Q_{q_{in}}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_0(t)}{T_{q_{in}}(t)}\right)$, $Q_{q_{out}}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_0(t)}{T_{q_{out}}(t)}\right)$ – ексергія вхідного та вихідного теплового потоку відповідно, Вт; $W_{cv, w_{in}}(t)$, $W_{cv, w_{out}}(t)$ – ексергія роботи на вході та виході із контрольного об'єму відпо-

струкцію ексергії. Показано, що використання прогнозного керування та динамічної ексергетичної моделі об'єкта у порівнянні із прогнозним керуванням на основі енергетичного підходу дає можливість зменшити деструкцію ексергії на 4 % та зекономити більше ніж 12 % енергетичних ресурсів.

В статті [9] запропоновано контролер, що базується на застосуванні ексергетичного підходу, і призначено для керування парокompресійного теплового насоса. Для оптимізації роботи установки в динамічних режимах роботи застосовано прогнозне керування із використанням критеріїв ексергетичної ефективності. Результати моделювання в заданих умовах показали, що у порівнянні із застосуванням прогнозного керування на базі суто енергетичного підходу, запропонований підхід дає можливість підвищити в середньому ексергетичний ККД на 40 %. В основі створення прогнозного керування авторами [9] використано рівняння ексергетичного балансу з урахуванням акумуляції ексергії.

Отже, застосування методів ексергетичного аналізу для удосконалення керуванням об'єктів теплоенергетики загалом та систем опалення, вентиляції й кондиціонування зокрема є актуальною науково-практичною задачею. Основою створення таких автоматизованих систем керування є розроблення та реалізації математичних та комп'ютерних моделей ексергетичного аналізу з урахуванням динаміки роботи об'єкта, де має місце акумулювання речовини, енергії та ексергії.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є оцінювання впливу накопичення ексергії в баках-акумуляторах під час перехідних процесів на результати розрахунку ексергетичних показників.

Виклад основного матеріалу

Загальний вигляд рівняння ексергетичного балансу контрольного об'єму з урахуванням акумуляції ексергії має вигляд:

відно, Вт; $E_{in, i}(t)$, $E_{out, j}(t)$ – ексергія потоку речовини на вході та виході із контрольного об'єму відповідно, Вт; $dE_{cv}(t)/dt$ – швидкість зміни ексергії, що накопичується в контрольному об'ємі, Вт.

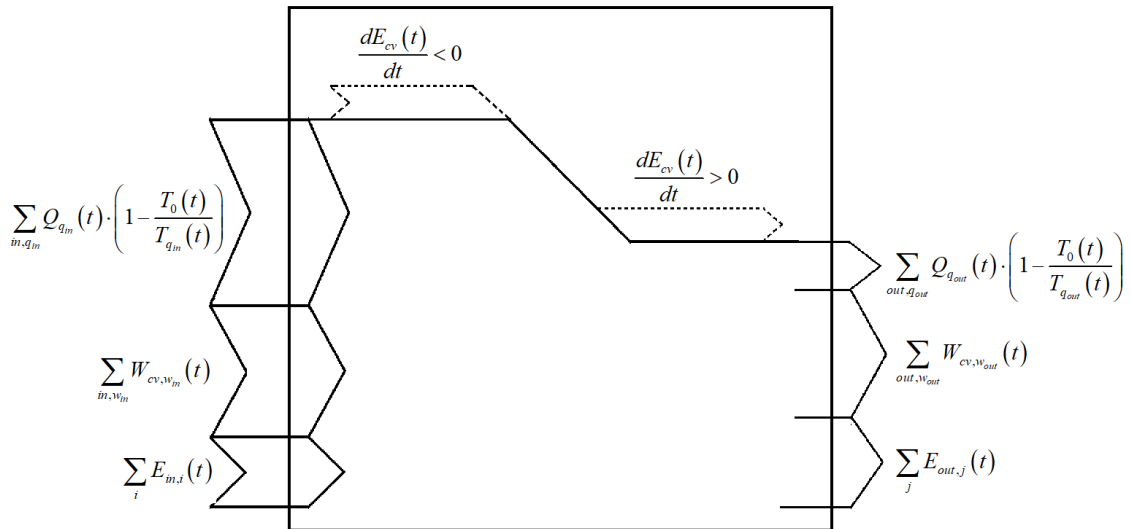


Рис. 1 – Ексергетичний баланс компонента під час динамічних процесів [5]

Графічне представлення ексергетичного балансу контрольного об'єму під час динамічних процесів наведено на рис. 1 [5]. Бачимо, що у випадку, коли в контрольному об'ємі має місце накопичення певної кількості ексергії, то $dE_{cv}(t)/dt > 0$. В даному випадку ця частина відноситься до ексергії продукту. Якщо $dE_{cv}(t)/dt < 0$, то уже закумуляована раніше в контрольному об'ємі ексергія використовується для отримання ефекту та є ексергією палива. Отже, врахування в рівнянні (1) доданку $dE_{cv}(t)/dt$ дає можливість коректно розрахувати ексергетичні показники.

Ексергетичний аналіз передбачає, зокрема, визначення таких показників як ексергія палива, ексергія продукту, деструкція ексергії, ексергети-

чний ККД. Для розрахунку відповідного ексергетичного показника за певний період необхідно проінтегрувати відповідні складові рівняння (1). У випадку нехтування акумуляції ексергії в контрольному об'ємі останній доданок правої частини рівняння (1) необхідно прирівняти до нуля.

Особливістю систем теплозабезпечення будинків є те, що через вплив погодних-кліматичного фактору вони працюють у змінних (динамічних) режимах, і характеризуються значною інерційністю.

Ексергію палива, що споживається в баці-акумуляторі за певний період (від моменту часу t_1 до t_2) та ексергію продукту, що генерується в баці-акумуляторі за цей же період, пропонується визначати за формулами:

$$E_{F,1-2} = \int_{t_1}^{t_2} E_F(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} E_{in,hot}(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} E_{out,hot}(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} dE_{cv,hot}(t); \quad (2)$$

$$E_{P,1-2} = \int_{t_1}^{t_2} E_P(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} E_{out,cold}(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} E_{in,cold}(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} dE_{cv,cold}(t), \quad (3)$$

де $E_{in,hot}(t), E_{out,hot}(t), E_{in,cold}(t), E_{out,cold}(t)$ – ексергія потоку гарячого теплоносія на вході та виході із бака-акумулятора та ексергія потоку холодного теплоносія на вході та виході із бака-акумулятора відповідно, Вт;

$dE_{cv,hot}(t), dE_{cv,cold}(t)$ – кількість закумуляованої в контрольному об'ємі ексергії за елементарний проміжок часу зі сторони гарячого та холодного теплоносія відповідно.

У свою чергу ексергія відповідного потоку (в загальному випадку позначається індексом X) визначається за формулою:

$$E_X(t) = G_X(t) \left[(h_X(t) - h_{0,X}) - T_0 (s_X(t) - s_{0,X}) \right], \quad (4)$$

де G_X – масова витрата потоку, кг/сек;

$h_X(t), h_{0,X}$ – ентальпія потоку із заданими параметрами та параметрами навколишнього середовища (в дослідженнях прийнято, що температура та тиск навколишнього середовища відповідно рівні 25 °C та 0,1 МПа) відповідно, кДж/кг;

$s_X(t), s_{0,X}$ – ентропія потоку із заданими параметрами та параметрами навколишнього середовища відповідно, кДж/(кг·K);

T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Кількість закумуляованої в контрольному об'ємі ексергії можна визначити за формулами:

$$\int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, hot}(t) = M_{hot} \cdot c_p \cdot \left[T_{hot, fin} - T_{hot, init} - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{hot, fin}}{T_{hot, init}} \right) \right], \quad (5)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, cold}(t) = M_{cold} \cdot c_p \cdot \left[T_{cold, fin} - T_{cold, init} - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{cold, fin}}{T_{cold, init}} \right) \right], \quad (6)$$

де c_p – питома масова ізобарна теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);

M_{hot}, M_{cold} – маси акумулюючих ємностей контрольного об'єму відповідно зі сторони гарячого та холодного теплоносіїв, кг;

$T_{hot, fin}, T_{hot, init}$ – температури акумулюючої ємності зі сторони гарячого теплоносія у стаціонарних режимах відповідно після та до нанесення збурення, К;

$T_{cold, fin}, T_{cold, init}$ – температури акумулюючої ємності зі сторони холодного теплоносія у стаціонарних режимах відповідно після та до нанесення збурення, К.

рних режимах відповідно після та до нанесення збурення, К.

Ексергетичний ККД бака-акумулятора за період часу від моменту t_1 до t_2 пропонується визначати за формулою:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} E_P(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} E_F(t) dt}. \quad (7)$$

Деструкцію ексергії в баках-акумуляторах за цей же період часу можна визначати за формулою:

$$E_{D,1-2} = E_{F,1-2} - E_{P,1-2} = \int_{t_1}^{t_2} E_D(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} E_{in, hot}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} E_{out, hot}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} E_{out, cold}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} E_{in, cold}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, hot}(t) - \int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, cold}(t). \quad (8)$$

У випадку нехтування акумуляції ексергії в контрольному об'ємі у формулах (2), (3) та (8) доданки $\int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, hot}(t)$ та $\int_{t_1}^{t_2} dE_{cv, cold}(t)$ необхідно прирівняти до нуля.

Визначимо похибку з розрахунку відповідного ексергетичного показника з та без врахування акумуляції ексергії за формулою:

$$\gamma = \frac{Y' - Y''}{Y'} \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = G_{hot} \cdot c_p \cdot [T_{in, hot} - T(t)] - G_{cold} \cdot c_p \cdot [T(t) - T_{in, cold}], \quad (10)$$

де M – маса акумулюючої ємності, яка повністю віднесена до холодного теплоносія, тобто прийнято, що $M_{hot} = 0, M_{cold} = M$, кг;

$T(t)$ – температури теплоносіїв, що знаходиться в баці, та виходять з нього, і є функцією часу, К;

$T_{in, cold}, T_{in, hot}$ – відповідно температура холодного та гарячого теплоносія на вході в бак-акумулятор, К;

G_{cold}, G_{hot} – відповідно витрата холодного та гарячого теплоносія, кг/сек.

де Y', Y'' – значення відповідного ексергетичного показника (ексергії палива, ексергії продукту, деструкції ексергії та ексергетичного ККД) за проміжок часу від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 відповідно з та без урахування акумуляції ексергії в контрольному об'ємі.

Для дослідження перехідного процесу було створено спрощену математичну модель, де зокрема передбачено ідеальне перемішування теплоносіїв [10]:

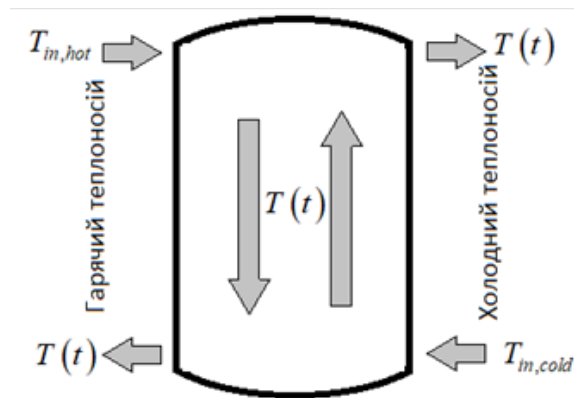


Рис. 2 – Розрахункова схема бака-акумулятора

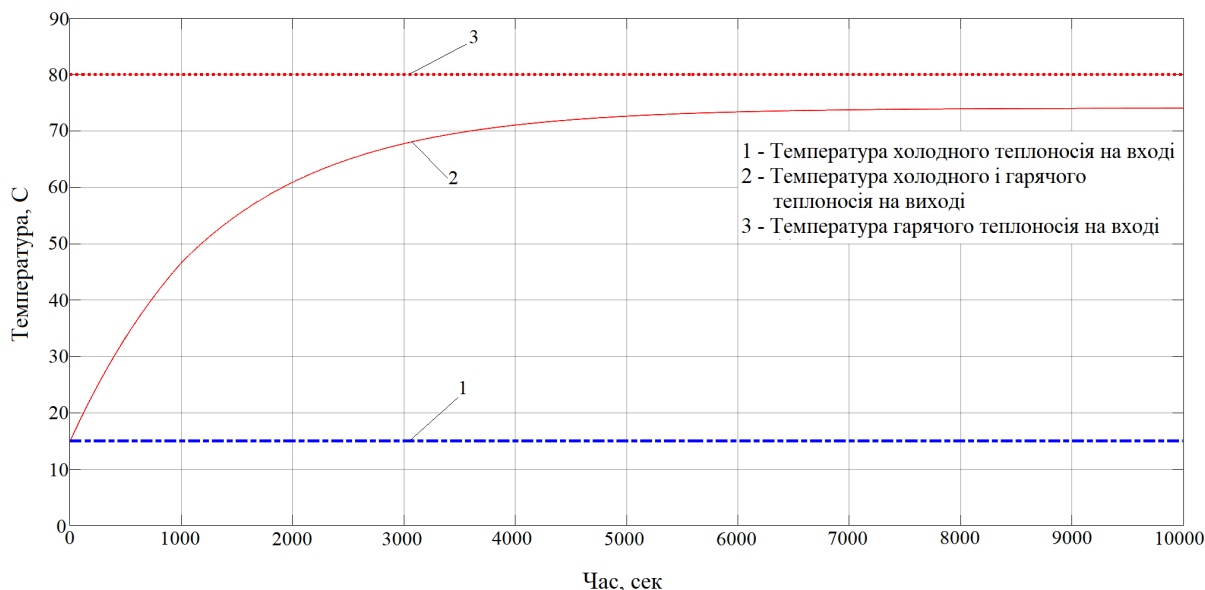


Рис. 3 – Графіки зміни температур теплоносіїв у баці-аккумуляторі під час реалізації перехідного процесу

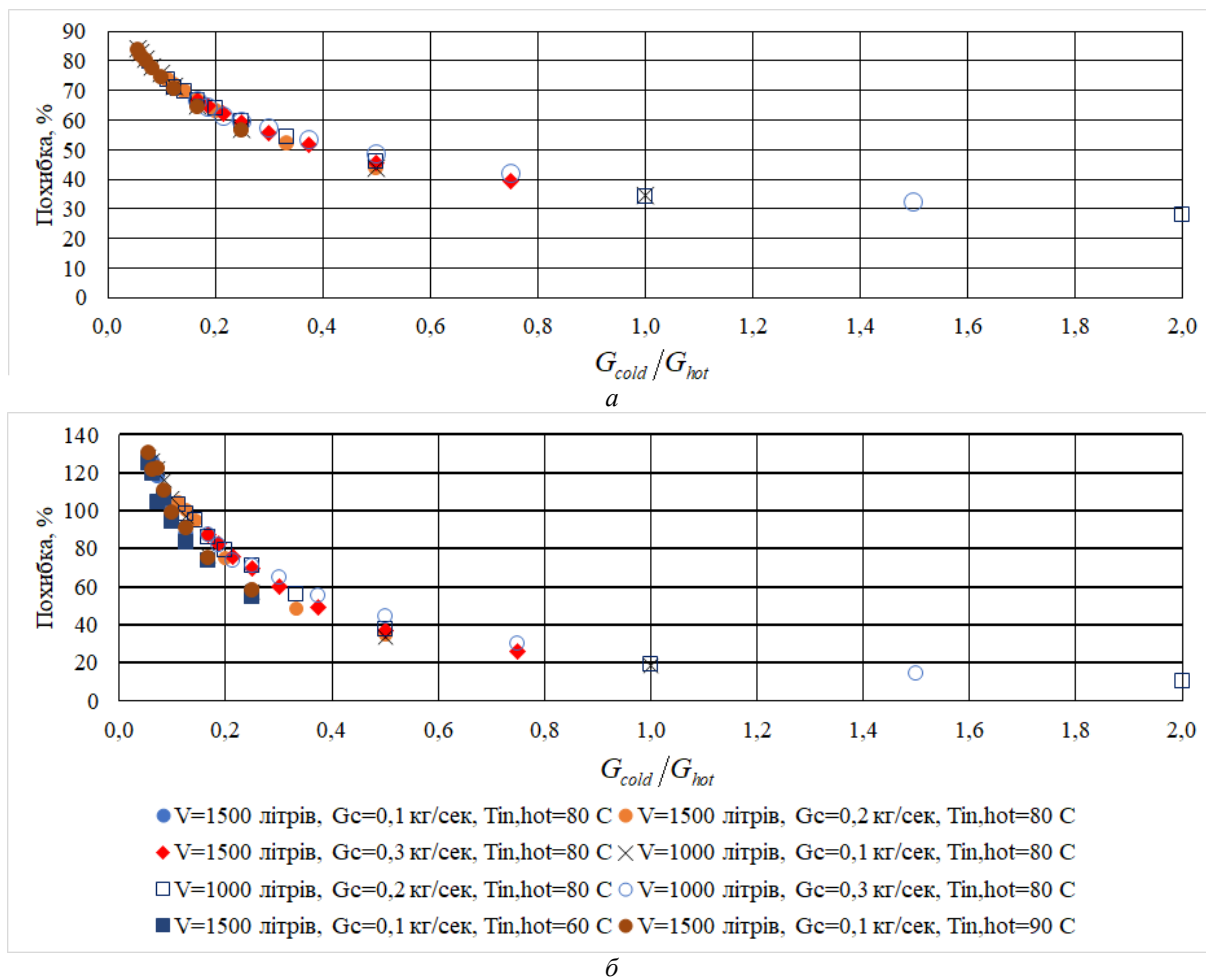


Рис. 4 – Залежність похибки γ від відношення витрат G_{cold}/G_{hot} у випадку розрахунку:
 а – ексергії продукту та ексергетичного ККД; б – деструкції ексергії

Обговорення результатів

В роботі досліджено ексергетичні характеристики для баків-акумуляторів з акумулюючими об'ємами 1000 м³, 1500 м³. Теплоносієм є вода. Температура холодного теплоносія на вході в бак-акумулятор $T_{in,cold}$ рівна 25 °С, а температура гарячого теплоносія на вході в бак-акумулятор $T_{in,hot}$ становила 60 °С, 80 °С та 90 °С. Витрата гарячого теплоносія G_{hot} змінювалася в межах 0,1...1,8 кг/сек, а холодного – в межах 0,1...0,3 кг/сек. Досліджувалося включення режиму одночасного зарядження бака-акумулятора та споживання енергії.

Математичну модель дослідження ексергетичних характеристик об'єкту реалізовано в середовищі *Matlab*. Приклад змін температур гарячого та холодного теплоносіїв у перехідному процесі наведено на рис. 3. Із рис. 3 бачимо, що для заданих умов час перехідного процесу t_{trans} триває приблизно 7000 секунд. В дослідженнях ексергетичні показники визначалися для періоду перехідного процесу (тобто $t_1 = 0$, а $t_2 = t_{trans}$).

Враховуючи прийняте припущення – а саме те, що $M_{hot} = 0$, похибка γ з розрахунку ексергії палива відсутня. На рис. 4,а наведено графік залежності похибки γ з розрахунку ексергії продукту та ексергетичного ККД від відношення витрати холодного теплоносія до гарячого (G_{cold}/G_{hot}). Бачимо, що дана похибка не залежить від прийнятих в дослідженнях об'ємів баків та початкових температур теплоносіїв. Із зменшенням відношення G_{cold}/G_{hot} до значення 0,06 похибка із розрахунку ексергії палива та ексергетичного ККД без урахування накопичення досягає 84 %. Якщо $G_{cold}/G_{hot} = 2,0$, то дана похибка зменшується до 28 %.

Графік залежності похибки γ з розрахунку деструкції ексергії залежно від відношення витрат G_{cold}/G_{hot} наведено на рис. 4,б. Видно, що так само, як і у попередньому випадку, похибка γ залежить від відношення витрат холодного та гарячого теплоносія, але практично не залежить від об'ємів баків та початкових температур теплоносіїв. Із рис. 5 видно, що зі зменшенням відношення G_{cold}/G_{hot} до значення 0,06 похибка із розрахунку деструкції ексергії у випадку неврахування накопичення досягає 130 %. Якщо відношення G_{cold}/G_{hot} зменшується, то і похибка зменшується, досягаючи значення 10 % у випадку, коли $G_{cold}/G_{hot} = 2,0$.

Такі досить суттєві значення похибок при відповідних умовах можуть призвести до неточнос-

тей в дослідженнях динаміки баків-акумуляторів на основі ексергетичного підходу, в тому числі у випадку застосування цього підходу у створенні автоматизованих систем керування.

Висновки

1 В роботі, на прикладі бака-акумулятора як компонента системи теплозабезпечення, показано доцільність врахування накопичення ексергії в контрольному об'ємі під час перехідних процесів для оцінювання ексергетичних показників.

2 Для заданих параметрів об'єкту визначено, що після нанесення ступеневого збурення, а саме включення режиму одночасного зарядження бака-акумулятора та споживання енергії, через неврахування накопичення ексергії, похибка в розрахунку таких ексергетичних показників як ексергії палива та ексергетичного ККД може досягати 80 %, а у випадку оцінювання деструкції ексергії – 130 %.

3 З'ясовано, що дані похибки залежать від відношення витрат холодного та гарячого теплоносіїв і зменшуються із збільшенням цього відношення, але практично не залежать від прийнятих у дослідженнях об'ємів баків та початкових температур теплоносіїв.

4 Врахування накопичення ексергії у контрольному об'ємі під час динамічних процесів буде реалізовано в наступних задачах створення систем автоматизованого керування на основі ексергетичного підходу.

Подяка

Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

Список літератури

1. Sarbu I., Sebarchievici C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage, *Sustainability*. 2018. vol. 191, no. 10(1), Jan. pp. 1–32. doi: 10.3390/su10010191.
2. *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Exergy Assessment Guidebook for the Built Environment*. IEA ECBCS Annex 49 Final Report, Fraunhofer Institute for Building Physics IBP, 2011. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/publikationen/eeer/summary-report-annex49.pdf>. [Accessed 28 September 2020].
3. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Dynamic exergetic assessment of heating and cooling systems in a complex building. *Energy Conversion and Manage.* 2019. vol. 183, Mar. pp. 561–576. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.090.
4. Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S. Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems. *Entropy*. 2019. vol. 22, no. 1, Dec. p. 32. doi: 10.3390/e22010032.

5. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system into endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system. *Int. J. Energy Res.* 2020. vol. 44, no. 6, Feb. pp. 4395–4410. doi: 10.1002/er.5213.
6. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T., Baranski M., Sangi R., Müller D. Exergy-based control strategies for the efficient operation of building energy systems. *J. of Cleaner Prod.* 2019. vol. 241, no. 118277, Dec., Art. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118277.
7. Sangi R., Müller D. Application of the second law of thermodynamics to control: A review, *Energy*. 2019. vol. 174, no. 1, May. pp. 938–953. doi: 10.1016/j.energy.2019.03.024.
8. Razmara M., Maasoumy M., Shahbakhti M., Robinett R. D. III. Optimal exergy control of building HVAC system. *Appl. Energy*. 2015. vol. 156, Oct. pp. 555–565. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.051.
9. Jain N., Alleyne A. Exergy-based optimal control of a vapor compression system. *Energy Conversion and Manage.* 2015. vol. 92, Mar. pp. 353–365. doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.014.
10. Raccanello J., Rech S., Lazzaretto A. Simplified dynamic modeling of single-tank thermal energy storage systems. *Energy*. 2019. vol. 182, pp. 1154–1172. doi: 10.1016/j.energy.2019.06.088.
- neu/de/dokumente/publikationen/er/summary-report-annex49.pdf. [Accessed 28 September 2020].
3. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. (2019), “Dynamic exergetic assessment of heating and cooling systems in a complex building”, *Energy Conversion and Manage.*, vol. 183, Mar, pp. 561–576, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.090.
4. Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S. (2019), “Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems”, *Entropy*, vol. 22, no. 1, Dec., p. 32, doi: 10.3390/e22010032.
5. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. (2020), “Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system into endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system”, *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 6, Feb., pp. 4395–4410, doi: 10.1002/er.5213.
6. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T., Baranski M., Sangi R., Müller D. (2019), “Exergy-based control strategies for the efficient operation of building energy systems”, *J. of Cleaner Prod.*, vol. 241, no. 118277, Dec., Art., doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118277.
7. Sangi R., Müller D. (2019), “Application of the second law of thermodynamics to control: A review”, *Energy*, vol. 174, no. 1, May, pp. 938–953, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.024.
8. Razmara M., Maasoumy M., Shahbakhti M., Robinett R. D. III. (2015), “Optimal exergy control of building HVAC system”, *Appl. Energy*, vol. 156, Oct., pp. 555–565, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.051.
9. Jain N., Alleyne A. (2015), “Exergy-based optimal control of a vapor compression system”, *Energy Conversion and Manage.*, vol. 92, Mar., pp. 353–365, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.014.
10. Raccanello J., Rech S., Lazzaretto A. (2019), “Simplified dynamic modeling of single-tank thermal energy storage systems”, *Energy*, vol. 182, pp. 1154–1172, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.088.

References (transliterated)

1. Sarbu I., Sebarchievici C. (2018), “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage”, *Sustainability*, vol. 191, no. 10(1), Jan, pp. 1–32, doi: 10.3390/su10010191.
2. (2011), *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Exergy Assessment Guidebook for the Built Environment*. IEA ECBCS Annex 49 Final Report, Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp->

Надійшла (received) 25.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Волощук Володимир Анатолійович (Волощук Владимир Анатольевич, Voloshchuk Volodymyr) – доктор технічних наук, професор, доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, в.о. завідувача кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ; тел.: (097) 611-84-34; e-mail: vl.volodya@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-8968>.

Некрашевич Олена Василівна (Некрашевич Елена Васильевна, Nekrashevych Olena) – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; тел.: (067) 135-08-82; e-mail: olena.nekrashevych@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2263-3549>.

Любицький Сергій Вікторович (Любицкий Сергей Викторович, Liubytzkyi Serhii) – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; тел.: (093) 606-49-66; e-mail: lyubitsky@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4419-6012>.