

С. Г. Кійко<sup>1</sup>, Є. А. Дружинін<sup>2</sup>, О. В. Прохоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПрАТ Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» імені А. М. Кузьміна, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСАМИ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

**Анотація.** Розроблено агентну імітаційну модель аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження. Розкрито особливості інформаційної взаємодії агентів в мультиагентній системі, за рахунок механізмів, пов'язаних з децентралізованим мультипроектним плануванням, що включає вирішення ресурсних конфліктів при виконанні завдань, пошук найбільш оптимальних ресурсів, при використанні яких виконання робіт буде відбуватися на найбільш вигідних умовах. Використання даної моделі дозволяє послідовно проводити аналіз проектів з метою виявлення можливості їх реалізації на підприємстві, узгоджувати плани реалізації проектів і плани підприємства на різних рівнях планування. Запропонований підхід має відмінні риси: інтеграція стратегічних рішень (прийняти або відхилити нові проекти) і оперативних аспектів (розподіл ресурсів); можливість гнучкого управління ресурсами.

**Ключові слова:** портфель проектів енергозбереження, реалізуємість проекту, ризик, розподіл ресурсів, агентна модель, металургійне підприємство.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Формування науково-обґрунтованої стратегії енергозбереження має дуже важливе значення для металургійних підприємств при реалізації цілей по економії енергетичних ресурсів, скорочення викидів, мінімізації витрат і підвищення ефективності та конкурентоспроможності. Загальна мета підвищення енергоефективності на підприємстві реалізується на основі управління портфелем енергозберігаючих проектів, які спрямовані на виконання таких завдань: оптимізація енергетичного балансу; мінімізація споживання енергоресурсів (палива – природного та доменного газу, електроенергії, теплової енергії); оптимізація енергоефективності та ін. Оцінити і відібрати для реалізації проекти енергозберігаючих заходів, об'єктивно оцінити частку кожного енергоресурсу в загальному потоці, визначити енергоємність окремого виробництва, цеху, всього підприємства, скорегувати стратегічний напрямок в управлінні енергоресурсами дозволить наявність моделі енергоспоживання на підприємстві. Для реалізації оптимального управління енергетичними потоками пропонується метод, який використовує мультиагентний підхід, що полягає в формуванні спільноти агентів енергоспоживання, енергоперетворення, енерговиробництва і покупки електроенергії на зовнішньому ринку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Деякі особливості моделювання енергоспоживання на верхньому рівні управління розглядаються в роботі [1]. Авторами визначено основні закономірності формування енергоспоживання на металургійних підприємствах.

В роботі [2] використовуються гібридні мережі Петрі для моделювання та аналізу металургійних процесів. Динамічний потік матеріалів і зміни в ре-

альному часі кожного технологічного стану в металургійному процесі наочно моделюються за допомогою цієї моделі.

В роботі [3] розглядається проблема моделювання виробництва і споживання електроенергії в гібридних енергосистемах. Моделювання дозволило розрахувати оптимальну кількість і параметри компонент отримання відновлюваної електроенергії в залежності від прогнозованої потреби в її споживанні.

У роботі [4], виходячи з забезпечення стабільності енергопостачання та нормальної безпеки виробництва, використовувався метод математичного програмування та модель динамічної математичної оптимізації для встановлення надлишків газу в оптимальному розподілі серед буферних споживачів та диспетчеризації виробництва пару.

Особливості нормування споживання електроенергії у виробництві на підприємствах чорної металургії наведено у роботі [5]. Авторами описано багаторівневу структуру нормування споживання електроенергії за результатами дослідження.

У роботі [6] наведено метод оцінки стану управління енергоресурсами в гірничорудній та металургійній галузях за допомогою мультиплікативної моделі впливу технологічних та управлінських факторів та застосування теорії дискримінації.

У роботі [7] представлені результати оптимізації витрат на електроенергію на прикладі одного з металургійних підприємств, наведено основні відомості про розроблення імітаційної моделі та етап оптимізації.

В роботі [8] сформульовані основні проблеми управління електроспоживанням і енергозбереженням в металургійному виробництві, розглянуті завдання нормування, планування енерговитрат за рівнями управління. Авторами запропонований метод прогнозування витрат енергоресурсів, заснова-

ний на побудові регресійних моделей з включенням фактору часу.

Рішення завдання прогнозування електроспоживання на основі багатофакторного регресійного і кореляційного аналізів наведено в роботах [9; 10].

В роботі [11] дана математична постановка задачі оптимального прогнозу споживання газу на металургійному підприємстві по техніко-економічним критеріях, яка зведена до спеціалізованої задачі нелінійного математичного програмування.

Мультиагентний підхід до управління портфелем проектів розглядається в [12]. Автор наводить системну архітектуру агентної моделі, цілі функціонування і особливості програмної реалізації різних агентів. Однак за межами викладу залишилися моделі поведінки агентів при вирішенні задач портфельного управління. Мультиагентні технології мають значні переваги з точки зору побудови автономних, адаптивних, з можливостями аукціонної і скоординованої взаємодії своїх елементів систем моделювання, що робить їх кращим підходом для вирішення завдання децентралізованого мультипроектного планування.

**Мета статті** – розроблення агентної моделі управління розподілом енергоресурсів, що базується на взаємодії агентів постачальників, агентів споживання, агентів виробництва і агентів перетворення енергоресурсів, що виконують пошук відповідності на внутрішньому «ринку» наявних енергоресурсів або зовнішньому енергоринку.

### Імітаційна модель енергоспоживання на металургійному підприємстві

Агентне моделювання передбачає, що модель включає множину взаємодіючих між собою і з зовнішнім середовищем агентів – інформаційних (програмних) елементів, які мають свої цілі і завдання, внутрішній стан і правила поведінки.

Відмінною особливістю агентних моделей є те, що вони децентралізовані і в них відсутня централізована поведінка системи в цілому. Ці можливості радикально відрізняють агентні системи від існуючих «жорстко» організованих моделюючих програмних систем, забезпечуючи їм таку принципово важливу нову властивість, як здатність до самоорганізації. При цьому окремі автономні «частини» моделюючої програми – агенти – отримують можливість самостійно приймати рішення і домовлятися про те, як повинні вирішуватися завдання, вони набувають власну активність і можуть вступати в різні відносини між собою, ініціювати діалог з користувачем в заздалегідь не визначені моменти часу тощо. Таким чином, визначається поведінка на індивідуальному рівні, а глобальна поведінка виникає як результат діяльності багатьох агентів, кожен з яких має свої власні правила, функціонує в загальному середовищі і взаємодіє із середовищем і з іншими агентами.

Розглядаючи основні переваги агентного підходу при імітаційному моделюванні процесів управління енергоспоживанням на металургійному підприємстві, слід зазначити наступне:

- принцип автономності різних частин моделюючої програми (агентів), спільно функціонуючих

в розподіленій системі, де одночасно протікає множина взаємопов'язаних процесів;

- наявність елементів індивідуальної поведінки (від простих умов і обмежень, до складних, які враховують цілі та стратегії);

- агенти мають можливість навчатися, адаптуватися і змінювати свою поведінку, мати динамічні зв'язки з іншими агентами, які можуть формуватися і зникати в процесі функціонування і ін.

Застосування мультиагентного підходу в задачах імітаційного моделювання виробничих систем вимагає вирішення в тій чи іншій мірі наступних основних завдань: визначення складу і розподіл ролей агентів серед основних компонент системи імітаційного моделювання; формування розподіленої бази знань агентів і побудова загальної онтології, що розділяється всіма агентами; створення інтелектуальних агентів з механізмами логічного висновку рішень; організація і планування дій інтелектуальних агентів; розробка механізмів взаємодії агентів, включаючи такі як, кооперація, конкуренція, компроміс, конформізм, ухилення від взаємодії, вироблення стратегій агентів при колективній поведінці.

Одним з центральних завдань при агентному моделюванні поточкових процесів енергоспоживання в даній системі є формування множини альтернативних варіантів споживання і виробництва енергоресурсів. Така модель необхідна для оперативного управління процесами розподілу і споживання енергоресурсів у внутрішньозаводських та внутрішньоцехових мережах, а також для контролю за режимом роботи основного енергоємного технологічного обладнання. В цьому випадку найпростіший варіант організації мультиагентної спільноти при вирішенні завдань з управління розподілом енергоресурсів може бути заснований на взаємодії агентів постачальників, агентів споживання, агентів виробництва і агентів перетворення, що виконують пошук відповідності на внутрішньозаводському «ринку» наявних енергоресурсів або зовнішньому енергоринку (рис. 1).

Конкуруючи і кооперуючись між собою при укладанні «угод» для спільного вирішення виникаючих завдань (для чого агенти можуть використовувати розвинені економічні механізми, включаючи пайову участь, аукціони тощо), агенти можуть забезпечити системі нові можливості в самоорганізації для постійного пристосування до ситуацій, що швидко змінюються.

Використання поняття аукціону в переговорах агентів забезпечує можливість явної передачі «корисності» (у вигляді ціни) від одного агента до іншого. Аукціон виступає в якості ринкового механізму самоорганізації колективної поведінки, і з його допомогою можна сконструювати таку схему торгів, яка забезпечить необхідні характеристики мультиагентної системи. На аукціоні деякі ресурси, які необхідні для досягнення мети декількома агентами, виставляються на «продаж». Ресурси ці обмежені, тому агенти змагаються між собою в процесі торгів. Можливості «покупки» ресурсів агентами також обмежені, а доцільність покупки оцінюється функцією корисності ресурсу, яка, як правило, обчислю-

ється у вигляді різниці між доходом від використання ресурсу і витратами на його покупку.

Ієрархічна архітектура агентної моделі припускає наявність одного або декількох агентів «метарівня», які здійснюють координацію розподіленого вирішення задач іншими агентами. Крім того, можливі ситуації коли агенти можуть утворювати коаліцію з метою оптимізації своїх витрат, наприклад, на залучення ресурсів. При цьому використання ідей колективної поведінки призводить до необхідності

вирішення багатьох проблем. Серед них слід виділити такі проблеми, як формування спільних планів дій, можливість врахування інтересів компаньйонів агенту, синхронізація спільних дій, наявність конфліктуючих цілей, наявність конкуренції за спільні ресурси, організація переговорів про спільні дії, розпізнавання необхідності кооперації, вибір підходящого партнера, навчання поведінці в колективі, декомпозиція задач і розподіл обов'язків, правила поводження в колективі, спільні зобов'язання тощо.

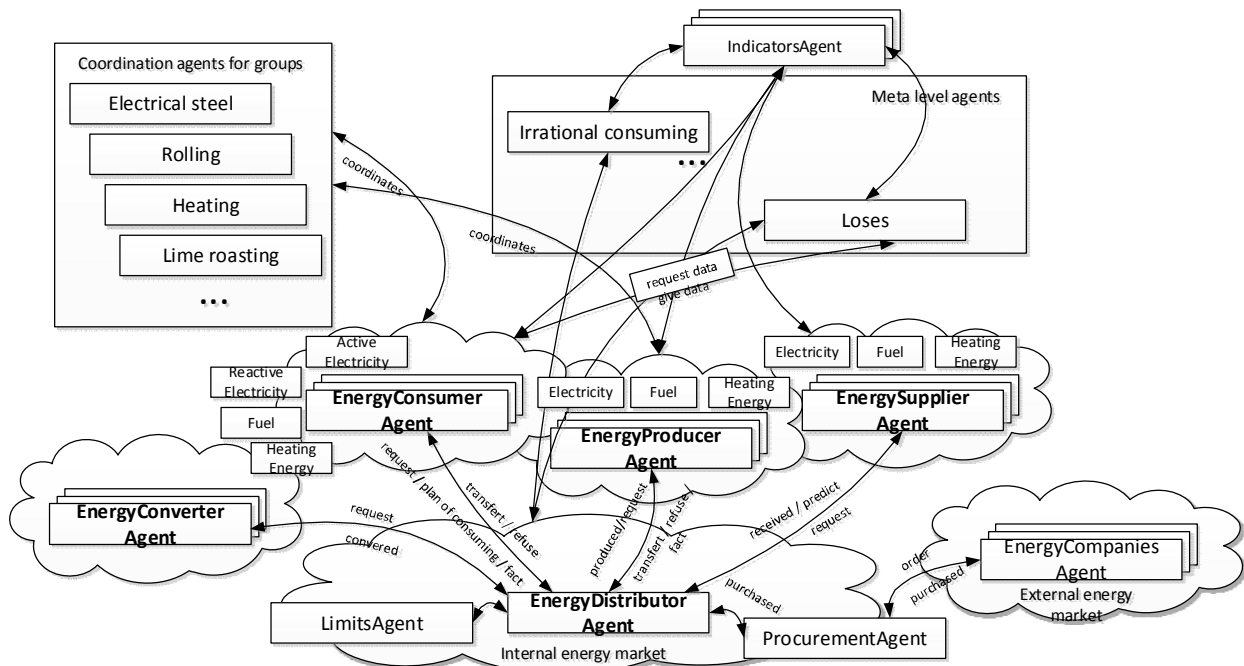


Рис. 1. Агентна модель енергоспоживання на металургійному підприємстві

Розглянемо, як розглянуті особливості знаходять своє відображення в розробленій агентній імітаційній моделі аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства.

При формуванні агентного уявлення імітаційної моделі необхідно виходити з виділення елементів з індивідуальною поведінкою. Всі куплені або вироблені енергоресурси продаються по трансфертній ставці агенту енергорозподілу, всі споживані енергоресурси купуються у агента енергорозподілу по трансфертній ставці. При цьому агенти енергоспоживання видають агенту енергорозподілу прогноз споживання на певну перспективу. При нестачі ресурсів у них вони купують їх у агента енергорозподілу. Агенти енергоспоживання підрозділяються за видами споживаного енергоресурсу: активної та реактивної електроенергії, теплової енергії, палива. Наприклад, для кожного агента споживання електроенергії задаються наступні параметри: потужність, розрахунковий струм лінії, марка, перетин і довжина кабелю лінії, питомий опір дроту, кількість автоматів приймачів електроенергії, кількість магнітних пускачів приймачів електроенергії, коефіцієнт завантаження лінії. Так формуються характеристики електрообладнання кожної ділянки.

Агент енергорозподілу фіксує заявки в своїй базі, контролює ліміти і акцептує їх, узгоджуючи зі

станом ресурсів, поточного енергобалансу і допустимими ризиками. Тут визначається поточний стан, в рамках якого виявляється нестача або надлишок енергоресурсів на визначений термін. Відповідно йде або використання наявних енергоресурсів або продаж енергоресурсів або покупка енергоресурсів.

Таким чином виходить ринок "на добу вперед" – він працює за принципом біржі, на якій визначається індикативна ціна на енергоресурс, на яку орієнтуються всі учасники при укладанні «договорів» і подають свої заявки сьогодні на завтра.

Передача ресурсів агентам енергоспоживання здійснюється відповідно визначених пріоритетів, призначення яких – це вирішення проблеми об'єднання досягнення цільових установок за показниками ефективності та прибутковості. Агент енергорозподілу може їм і відмовити у виділенні ресурсів, якщо є розбіжність з сумою заявки, мається на даний момент дефіцит або перевищені встановлені ліміти. Перевірені заявки акцептуються. Акцептовані трансфертні операції беруть участь в подальших розрахунках при моделюванні, відхилені угоди можуть бути допрацьовані агентами (зміна обсягу енергоресурсів, терміну та інших атрибутів угоди) або видалені. Отримавши відповідь від агентів про здійснення операції, агент енергорозподілу також здійснює реєстрацію фактичних витрат енергоресурсів.

У разі перевищення ліміту виникає конфліктна ситуація, яку необхідно вирішити: або збільшити ліміт, або відхилити заявку, або переглянути енергобаланс і, відповідно, перерозподілити енергоресурси, взявши їх з інших агентів (груп).

Агент енергорозподілу виконує регулюючу функцію при встановленні трансфертних цін на паливо, електро- та теплоенергію, його основним завданням є врегулювання структури енергобалансу. Система цін і тарифів на енергоресурси повинна стимулювати зниження витрат виробників і економне витрачання енергії споживачів. Агент енергорозподілу також здійснює взаємодію з агентом закупівлі з метою покриття дефіцитів енергоресурсів.

Формування такого внутрішнього ринку енергоресурсів створює умови для формування різних тарифних пропозицій для споживачів, в тому числі в залежності від характерного для них графіка навантаження (наприклад, в залежності від часу доби). Основним механізмом взаємодії агентів стають переговори на укладення внутрішніх трансфертних угод по залученню / споживанню ресурсів між агентами енергоспоживання, поставки, виробництва і агентом енергорозподілу.

Важливою особливістю пропонованої моделі є також об'єднання розглянутих агентів в групи за напрямками. Критеріями виділення окремих груп агентів в моделі є: виконання комплексу взаємопов'язаних і близьких послуг і операцій, які становлять єдиний технологічний ланцюжок; наявність власного ринку діяльності; наявність органу, що управляє і координує діяльність. Передбачається виділення різних груп агентів виходячи з виконуваних операцій (електросталь, прокат, випал, очищення, термічна обробка і інші), ефективного обслуговування за видами клієнтів (корпоративне замовлення, державне замовлення, інвестиційне замовлення), за територіальним принципом. У загальному випадку агент може належати декільком групам. Для кожної сформованої групи здійснюється генерація агента-координатора (Electrical steel, Rolling, Heating і ін.). Багатовимірний і детальний розподіл показників енергоспоживання в рамках подібної структури дає можливість оцінювати ефективність і впливати на окремі структурні підрозділи, напрямки бізнесу і продукти.

Кожному агенту в моделі призначається свій перелік показників-індикаторів, моніторинг яких може вказувати на наблизення або настання небажаних (ризикових) ситуацій. Перевищення значеннями індикаторів встановлених меж є підставою для активації різних механізмів і ситуативних сценаріїв. Так при зниженні напруги нижче встановленого значення автоматично включається механізм балансування для його підтримки. Так само якщо мають місце втрати. В цьому випадку в системі генеруються агенти IndicatorAgents – їх число відповідає можливим варіантам вирішення ситуації, кожен з яких намагається здійснити своє завдання паралельно, реалізуючи сформований сценарій незалежно від інших і не маючи уявлення про їхнє існування. Тобто розрахунки ведуться одночасно для всіх альтернативних стратегій і сценаріїв. При цьому стратегії можуть бути скориго-

вані по ходу проведення розрахунків. Кожен агент постачальник, агент виробництва або споживач повинен відповідати за свій небаланс, тобто відхилення від графіка виробництва або споживання. Укладаючи двосторонні контракти або купуючи енергоресурси на внутрішньому або зовнішньому ринку на добу вперед, енергопостачальники і енергоспоживачі зобов'язуються забезпечити своє споживання і виробництво в певні години на відповідному рівні. При цьому вони є сторонами, відповідальними за баланс особисто (або входять на договірній основі в певну балансуєчу групу агентів). Забезпечити стовідсоткову відповідність контрактам на практиці не так вже й просто. Наприклад, можуть погіршитися погодні умови, що спричинить більший попит на електро- чи теплоенергію у споживачів в реальному часі або може статися непередбачений вихід з роботи трансформаторного обладнання та ін.

В рамках розробленої агентної моделі функція метарівня управління енергоефективністю виражається в коригуванні керуючих параметрів, що впливають на поведінку агентів в процесі інформаційної взаємодії (підвищення / зниження виробництва, скорочення витрат і ін.). Вектор керуючих впливів включає в себе коригування: лімітів енергоспоживання; усунення втрат енергоресурсів; використання або продаж енергії, що виробляється в основному виробництві та ін.

### Опис механізмів взаємодії агентів імітаційної моделі

Розглянемо механізм взаємодії агентів енергоспоживання і агента енергорозподілу докладніше.

На кожному кроці, взявши до уваги витрати на енергію за попередні періоди, агент енергоспоживання вирішує, чи варто робити такі дії, як прийняття заходів по підвищенню енергоефективності, наприклад, зниження споживання з метою зниження вартості. Агент енергорозподілу в свою чергу вирішує, чи слід проводити будь-які заходи для коригування поведінки агентів енергоспоживання, засноване на даних споживання за попередній період.

Агент енергорозподілу може надавати «пільги» (премії) агентам енергоспоживання для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності, як засіб зниження загального споживання енергії для підприємства. Енергоспоживання агента буде визначатися за формулою:

$$PU_{iT} = PU_{iT}^{NP} \prod_{t=1}^T PUE_{it}; \quad PU_{iT}^{NP} = MA_i \cdot K^A \times \\ \times \exp(\alpha_1 + \alpha_2 \ln(IT_{iT}) + \alpha_3 \ln(PC_{iT}) + \sum_{j=1}^{n-1} \beta_j TA_j),$$

де  $PU_{iT}$  – це енергія, споживана  $i$ -м агентом під час  $T$ ;  $PUE_{it}$  – ефект енергоспоживання від заходів з підвищення енергоефективності під час  $t$ ;  $PU_{iT}^{NP}$  – змінна, що представляє енергію, яка споживається  $i$ -м агентом під час  $T$  без урахування впливу заходів по підвищенню енергоефективності;  $PC_{iT}$  – це

вартість енергії, яку платить  $i$ -й агент під час  $T$ ;  $IT_{iT}$  – це оборот  $i$ -го агента під час  $T$ ;  $MA_i$  – оцінка ймовірності того, що  $i$ -й агент матиме нульове споживання енергії;  $TA_j$  – тип агента енергоспоживання;  $K^A$  – оцінка розмиття поправочного коефіцієнту зміщення логарифмічного перетворення;  $\alpha$  і  $\beta$  є коефіцієнтами регресії.

Таким чином, енергія, споживана агентом в певний період, залежить від типу до якого він відноситься, обороту за період, а також сукупної енергоефективності інвестицій.

Премії від агенту енергорозподілу для впровадження агентом енергоспоживання заходів щодо підвищення енергоефективності визначаються такими формулами:

$$EI_{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sum PU_{it} / \sum PU_{it-1} > PU_{iL} \text{ для } t \geq 1; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$ER_{it+1} = \begin{cases} U(a, b), & \text{якщо } EI_{i,t+1} = 1; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де  $EI$  є бінарною змінною, що вказує чи субсидує агент енергорозподілу заходи агента енергоспоживання щодо підвищення енергоефективності;  $\sum PU_{it}$  – це загальне споживання енергоресурсів для представників цього типу;  $ER$  – готовність агента енергоспоживання прийняти ризиковані інвестиції в скорочення енергоспоживання. Чим вище це співвідношення, тим вище повинна бути частка витрат на енергію до того, як агент енергоспоживання інвестує в заходи з підвищення енергоефективності, пов'язані з ризиком. Отже, високий коефіцієнт означає, що агент не схильний до ризику і навпаки;  $PU_{iL}$  – константа, що описує поріг, вище якого агент енергорозподілу забезпечить стимули для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності;  $U$  позначає рівномірний розподіл. Рівняння для  $EI$  вказує, чи збільшиться загальне споживання енергії більш ніж на певне значення в процентному співвідношенні коли агент енергорозподілу надасть субсидії на заходи з підвищення енергоефективності. Рівняння для  $ER$  вказує, що агент енергорозподілу повинен субсидювати агентів енергоспоживання, це вплив на профілі ризиків окремих агентів енергоспоживання для вжиття заходів щодо підвищення енергоефективності є стохастичним і описується рівномірним розподілом.

Параметри закону розподілу задаються таким чином, щоб субсидії спонукали агентів енергоспоживання інвестувати в заходи з підвищення енергоефективності. Вживання заходів щодо підвищення енергоефективності для окремого агента енергоспоживання визначається наступним співвідношенням:

$$EE_{it+1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } PC_i \cdot PU_{it} / IT_{it} > SR_i + ER_{it}; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$PUE_{it+1} = \begin{cases} U(a, b), & \text{якщо } EE_{it} = 1; \\ 1, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де  $EE$  – бінарна змінна, яка показує чи робить агент енергоспоживання будь-які заходи з енергоефективності;  $PUE_{it}$  – є ефективність заходів  $i$ -го агента по споживанню енергії;  $SR_i$  – первісна (за вирахуванням ефекту втручання агента енергорозподілу) готовність агента енергоспоживання проводити заходи з енергоефективності (моделюється нормальним розподілом).

У представленому рівнянні для  $EE$  видно, що коли витрата енергії у відсотках від обороту в період часу  $t$  вище порога (тобто профілю ризику агента енергоспоживання в цій моделі), агент енергоспоживання робитиме деякі заходи щодо підвищення енергоефективності. Рівняння для  $PUE$  показує, що характер впливу заходів по підвищенню енергоефективності по споживанню енергії імовірнісний і моделюється рівномірним розподілом. Діапазон параметрів  $a$  і  $b$  є наступним  $0 < a < b < 1$ . Це означає, що заходи щодо підвищення енергоефективності скорочують споживання енергії в порівнянні з попереднім періодом. Слід врахувати, що спочатку моделювання передбачається, що ніяких заходів щодо підвищення енергоефективності ніяким агентом енергоспоживання не робиться і відсутні субсидії і втручання в енергетичний ринок з боку агента енергорозподілу. Надалі при зверненні до агента енергорозподілу агент енергоспоживання може вирішити залитися на своєму поточному рівні ефективності або підняти шкалу ефективності на більш високий рівень.

Таким чином, збільшення енергоефективності агентів енергоспоживання засноване на аналізі первісної системи параметрів і являє собою багатокроковий процес послідовної зміни станів через реалізацію проектів портфеля енергозбереження.

Модель прийняття рішення встановлює кількісні відносини між показниками стану технічної системи підприємства, експлуатаційними витратами, енергобалансом, операційними і конструктивними характеристиками підрозділів підприємства до і після реалізації енергозберігаючих проектів, зовнішніми впливами, капітальними витратами, що понесені в ході реалізації проектів, періодом моделювання та критеріями вибору проектів.

Далі розглянемо більш докладніше механізми відбору енергоефективних проектів для нашої агентної моделі. При цьому можливе використання двох типів енергоекономічних моделей – елементарна і комплексна. Елементарна відображає технічні та економічні особливості одного енергозберігаючого процесу, який належить одній з підсистем підприємства. Інтегрована дозволяє координувати основні характеристики елементарних проектів, які належать різним підсистемам підприємства (наприклад, для теплосистеми це опалювальна та електрична потужність машин і устаткування, діаметри труб центрального опалення тощо). Так для теплосистеми вартість економії паливного еквівалента є одним з аспектів енергоефективності – це досягається при перемиканні від однієї схеми реалізації до іншої за умови, що, наприклад, потужність і теплова потужність для споживача рівні.

Для того, щоб оцінити взаємозв'язок між станом підприємства, рентабельністю генерації тепла  $R$  і цінами на паливо і енергоресурси, пропонується наступне співвідношення:

$$1 + R = r \cdot (\eta_k^{br} - q_{tr loss}) / (k \cdot (1 + r_e \cdot (q_{sn} + q_n))),$$

де  $r = c/c_f$ ,  $r = c/c_f$  ( $c$  – вартість тепла,  $c_f$  – вартість палива,  $c_e$  – вартість електроенергії);  $\eta_k^{br}$  – енергоефективність опалювального агрегату;  $q_{tr loss}$  – втрати тепла,  $q_n$  – втрати електроенергії і  $q_{sn}$  – витрати на транспортування енергоносіїв;  $k$  – коефіцієнт додаткових витрат, пов'язаних з виробленням теплової енергії.

Виходячи з цього, моделюється можливість підключення агентів енергоспоживання до централізованого теплопостачання агента енергорозподілу. Значення річної економії паливного еквівалента  $\Delta B$  застосовується в якості критерію енергоефективності:

$$\Delta B = \Delta b_E - (b_{eltr} \cdot b_e + b_{fch}) \cdot Q > 0,$$

де  $\Delta b_E$  – питома економія паливного еквівалента;  $b_{eltr}$  – питомі втрати електроенергії при транспортуванні енергоносіїв;  $b_e$  – питомі втрати паливного еквіваленту при виробленні електроенергії після підключення споживача;  $b_{fch}$  – відноситься до питомих витрат паливного еквівалента, пов'язаних з компенсацією теплових витрат;  $Q$  – виробництво тепла на рік.

Встановлення ємності базового  $Q_b$  і пікового  $Q_p$  навантаження джерел тепла реалізуються з використанням критерію мінімізації сукупних витрат:

$$Z = k_b Q_b + k_p Q_p + n \left( \frac{E_b c_b a_b}{\eta_b} + \frac{E_p c_p a_p}{\eta_p} \right) \rightarrow \min,$$

де  $k_b$  і  $k_p$  – питомі капітальні витрати базового та пікового навантаження джерел тепла;  $E_b$  і  $E_p$  – кількість теплової енергії в рік;  $c_b$  і  $c_p$  позначають ціну первинного джерела енергії в стані базового навантаження і піку;  $\eta_b$  і  $\eta_p$  є коефіцієнтами перетворення первинного джерела енергії, що використовується для виробництва тепла;  $a_b$  і  $a_p$  – додаткові коефіцієнти витрат в станах базового навантаження і піку, які показують співвідношення між загальними експлуатаційними витратами і енергетичними затратами, понесеними при виробництві теплової енергії;  $n$  – період реалізації проекту енергозбереження.

Співвідношення потужностей  $Q_b$  і  $Q_p$  визначається граничною температурою атмосферного повітря  $^{\circ}C t_i$ . Якщо температура вище цього рівня, джерело тепла з базовим навантаженням несе теплове навантаження; якщо нижче граничного рівня – як базове навантаження, так і пікові джерела тепла несуть теплове навантаження.

Модель обґрунтовує застосування комбінованих джерел тепла з базовим та піковим навантаженням. Джерело тепла базового навантаження характеризується високою енергоефективністю і великими початковими витратами капіталу, в той час як джерело піку тепла показує відносно низьку енергоефективність і помірні початкові капітальні витрати. Математично задача енергозбереження є такою:

$$EP = e_1 x_1 + e_2 x_2 + \dots + e_i x_i + e_n x_n \rightarrow \max,$$

де  $EP$  – загальна економія, отримана за рахунок реалізації енергоефективних проектів;  $x_i$  це економія від  $i$ -го проекту портфеля;  $e_i$  це конкретна річна економія, отримана за рахунок відповідного проекту.

Множина допустимих альтернативних рішень породжується такою системою обмежень:

$$\begin{aligned} kx_1 + k_2 x_2 + \dots + k_i x_i + k_n x_n &\leq K; \\ x_1 &\leq X_1, x_2 \leq X_2, \dots, x_i \leq X_i, x_n \leq X_n; \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_i \geq 0, x_n \geq 0, \end{aligned}$$

де  $k_i$  конкретні витрати, понесені при реалізації проекту;  $x_i$  позначає максимально можливий ефект від проекту;  $K$  – кількість доступних ресурсів для використання, щоб реалізувати весь комплекс розглянутих проектів. Формула описує цільову функцію як загальну економію, отриману від реалізації проектів. Зазначені нерівності є очевидними невід'ємними умовами, які пов'язані з фінансовими обмеженнями і обмеженнями на ефект кожного проекту.

Розглянута задача має сенс, якщо:

$$kx_1 + k_2 x_2 + \dots + k_i x_i + k_n x_n > K.$$

Даний вираз означає, що кількість доступних ресурсів менше, ніж кількість ресурсів, необхідних для реалізації всіх проектів в повній мірі.

З метою розширення діапазону критеріїв відбору енергоефективних проектів зазначену вище цільову функцію можна представити у вигляді комплексного критерію корисності:

$$P = e_1 k_1 / T_{1av} + e_2 k_2 / T_{2av} + \dots + e_n k_n / T_{nav} \rightarrow \max,$$

де  $T_{iav}$  – середній ранг  $i$ -го проекту на основі критерію  $p$ ,  $T_{iav} = (T_{i1} + T_{i2} + \dots + T_{ia} + \dots + T_{ip}) / p$ ,  $T_{ia}$  – ранг  $i$ -го проекту на основі критерію  $a$ .

Поряд з періодом окупності, комплексний критерій корисності дозволяє врахувати інші ефекти проекту портфеля, використовуючи експертні методи, наприклад, підвищення енергетичної безпеки тощо. Таким чином були розглянуті деякі з механізмів агентної імітаційної моделі аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження.

### Результати експериментів

Мультиагентну модель розроблено в інструментальному середовищі імітаційного моделювання Anylogic. Розроблена модель дозволяє виявляти, аналізувати та вибирати перспективні проекти з енергозбереження, щоб вибрати серед них найбільш

життєздатний. В результаті експериментів вдалося оптимізувати портфель енергозберігаючих проектів і це дозволило зосередитись на найбільш бажаних цілях. Апробація розроблених моделей та комп'ютерних засобів у ПАТ «Дніпроспецсталь» засвідчи-

ла, що можливе ефективне управління енергоефективністю на основі управління програмами та портфелями проектів. Так в період з 2017 по 2019 рік на підприємстві було запроваджено заходи щодо енергозбереження, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Перелік енергозберігаючих проектів портфеля

Енергозберігаючий проект	Вартість, тис. грн.	Всього зекономлено, тис. т. ум. палива	Вартість зекономлених енергоресурсів, тис. грн.
Впровадження пристрою для редукування на ввіді пара №3	350	0,1845	1225
Проведення теплотехнічної наладки термічної печі прокатного цеху	440	0,0360	220
Проведення теплотехнічної наладки нагрівальних колодязів прокатного цеху	270	0,0220	135
Проведення теплотехнічної наладки установок «HELIOS» каліброваного цеху	290	0,0244	145
Проведення теплотехнічної наладки камерних печей	315	0,028	157,5
Впровадження інноваційних волокнистих матеріалів для футерування глісажних труб печі дрібносортового прокатного стану	560	0,097	1225
Впровадження перетворювальної техніки в залежності від режимів роботи устаткування	40	0.36	1745
Регулювання тиристорних перетворювачів намагнічування машин ГПА стану прокатного цеху в режимі роботи на холостому ході	50	0,216	1045

У сумі за допомогою даних заходів було заплановано і фактично досягнуто скорочення споживання природного газу на 1,5%, теплоенергії на 2%. За допомогою моделі було проведено оцінювання виконання цільового використання енергетичних ресурсів після реалізації проектів і заходів з енергозбереження. Було розраховано зміну ефективності споживання електричної енергії в результаті впровадження заходів з енергозбереження.

У якості фрагменту на рис. 2 наведено графік накопичених сум фактичного споживання енергоресурсів за один з місяців і цільового енергоспоживання, отриманого в результаті моделювання. Як видно з рисунку, підприємство зменшило споживання палива в результаті проведених заходів з енергозбереження.

Незважаючи на те, що підприємство не досягло цільового рівня енергетичної ефективності похибка прогнозу при моделюванні енергоспоживання для металургійного підприємства знаходиться на задовільному рівні.

Споживання електроенергії підприємством за 9 місяців 2019 року склало 276188,9 тис. кВт·г (рис. 3). Завдяки реалізації програми енергозбереження у 2019 році відповідно за такої ж період 2018 року підприємство заощадило 31025,2 тис. кВт·г та 61171,3 тис. куб.м. природного газу.

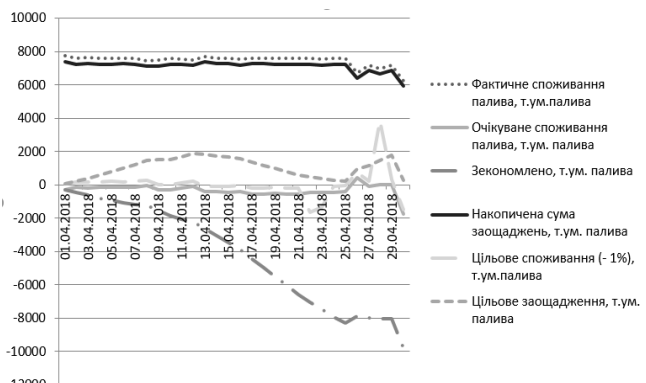


Рис. 2. Порівняння результатів моделювання і фактичного споживання палива



Рис. 3. Баланс споживання енергії ПАТ «Дніпроспецсталь» за 9 місяців 2019 року

Порівняно з 2011 р. споживання електроенергії на виробництво сталі для плавки зменшилось більш ніж на 30%.

Також частка витрат електроенергії на виробництво сталі для плавки зменшилась з 71% у 2011 році до 66% у 2019 році.

### Висновки

Таким чином, розроблено агентну імітаційну модель аналізу процесів управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації портфеля проектів енергозбереження.

Переваги мультиагентного підходу – можливість побудови автономних, адаптивних, з можли-

востями аукціонної і скоординованої взаємодії своїх елементів систем моделювання, що робить їх кращим підходом для вирішення завдання децентралізованого мультипроектного планування портфеля проектів енергозбереження.

Використання даної моделі дозволяє послідовно проводити аналіз проектів з метою виявлення можливості їх реалізації на підприємстві, узгоджувати плани реалізації проектів і плани підприємства на різних рівнях планування. Запропонований підхід має відмінні риси: інтеграція стратегічних рішень (прийняти або відхилити нові проекти) і оперативних аспектів (розподіл ресурсів); можливість гнучкого управління ресурсами.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shemetov A. Identification of the electricity consumption of metallurgical enterprises at the highest levels of management / A. Shemetov. – 2005. – pp. 135-140.
2. Yujuan R. Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net / R. Yujuan, H. Bao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 157.
3. Shcherbakov M.V. Multiagent system for modeling the production and consumption of electricity in hybrid power systems / M.V. Shcherbakov, A.S. Nabiullin, V.A. Kamaev // Engineering Bulletin of the Don. – 2012, vol. 20, no. 2. – pp. 217-221.
4. Jing-yu Liu An Optimization Model Based on Electric Power Generation in Steel Industry / Liu Jing-yu, Cai Jiu-ju // Mathematical Problems in Engineering. – vol. 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/924960>
5. Khoshimov F.A. Analysis of electricity consumption rationing at enterprises ferrous metallurgy [Електронний ресурс] / F.A. Khoshimov, I.U. Rakhmonov. – Technical science and innovation. – vol. 2018, iss. 1. – Режим доступу: <https://uzjournals.edu.uz/btstu/vol2018/iss1/9>.
6. Lyakhomskii A.V. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises / A.V. Lyakhomskii, A.B. Petrochenkov, E.N. Perfil'eva // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol. 86, iss. 6. – pp. 305–308.
7. Optimization of Energy Consumption of the Enterprise Using Simulation Modeling / V. Krysanov, A. Danilov, V. Burkovsky, P. Gusev, K. Gusev // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". – 2019. – pp 707-715.
8. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
9. Bianco V. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models / V. Bianco, O. Manca, S. Nardini // Energy. – 2009. – № 34. – pp. 1413-1421.
10. Dordonnat V. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling / V. Dordonnat, S.J. Koopman, M. Ooms // Computational Statistics and Data Analysis. – 2012. – №56. – pp. 3134-3152.
11. Казаринов Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургических предприятиях / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – №7(79). – 2007. – С. 24-26.
12. Lixin Zhou Multi-Agent Based Project Portfolio Management Approach / Zhou Lixin // Proceedings of the International Symposium on Intelligent Information Systems and Applications. – 2009. – pp. 240-243.

Received (Надійшла) 04.11.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.12.2019

### Imitation modeling of energy resources management processes of metallurgical enterprises

S. Kiyko, E. Druzhinin, O. Prokhorov

**Abstract.** As a result of the analysis of the energy saving program structure at the metallurgical enterprises, it was found the problems that are solved by the energy saving projects are inefficient consumption (significant losses) of energy resources (gas, thermal energy, electricity), control over the costs formation and the results of improvements in energy consumption. The overall goal of improving energy efficiency at the enterprise is realized through the management of a energy-saving projects portfolio, which are aimed at fulfilling the following tasks: optimization of energy balance; minimization of natural gas consumption; optimization of energy efficiency, etc. Success criteria for an energy-saving project include: efficiency; operating costs, losses, etc. It should be noted that it is difficult to objectively estimate the share of each energy resource in the total flow, to determine the energy intensity of individual production, departments and the whole enterprise, etc. To implement optimal management of energy flows at a metallurgical enterprise we proposed the method based on a multi-agent approach, which consists in forming a community of agents for energy consumption, energy conversion, energy production and the purchase of energy resources on the external market. An agent-based simulation model has been developed for analyzing the energy management processes of a metallurgical enterprise when implementing a portfolio of energy-saving projects. The article described the features of the information interaction of agents in a multi-agent system, due to mechanisms associated with decentralized multi-project planning, including the resolution of resource conflicts when performing tasks, the search for the most optimal resources, during which the work will be performed on the most favorable conditions.

**Keywords:** portfolio of energy saving projects, project feasibility, risk, resource allocation, agent model, metallurgical enterprise.