



- НЕРОДА М. В., ОНЫСЬКО С. Р., МАТИНОВСКАЯ О. В., ДРАГАН А. В., МИЩИРУКО М.** Исследование механических и пластических свойств стали марки 10кп с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования ..... **2**
- ПАРФИЕВИЧ А. Н., ДРАГАН А. В., СОКОЛ В. А.** Влияние изменяющихся условий эксплуатации на работу ранее обученной нейросетевой модели при выявлении локального повреждения рабочей поверхности зубчатого колеса ..... **4**
- ГОЛУБ В. М.** Методы повышения износостойкости и долговечности узлов трения машин ..... **10**
- ДАКАЛО Ю. А., ИШИН Н. Н., ГОМАН А. М., СКОРОХОДОВ А. С.** Влияние неисправностей зубчатых механизмов на параметры их вибраций ..... **13**
- ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., САЗОНОВ М. И., ХВИСЕВИЧ В. М.** Плазмотрон с гафниевым катодом для генерирования кислородной плазмы ..... **18**
- ХВИСЕВИЧ В. М., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., МАЗЫРКА М. В.** Построение сингулярных интегральных уравнений плоской задачи термоупругости для изотропных тел с переменным коэффициентом линейного расширения ..... **20**
- ЧЕКАН Н. М., ОВЧИННИКОВ Е. В., ХВИСЕВИЧ В. М., ЭЙСЫМОНТ Е. И., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ГОРЕЛЬЧИК А. Н.** Применение криогенных технологий при формировании вакуумных покрытий ..... **23**
- ПОБОЛЬ И. Л.** Ионное азотирование поверхности отверстий в длиннономерных изделиях из сталей ..... **25**
- SOKOROV I. O., VANUK E. A., GHAZBAN ZADEH E., KUIS D. V., LEVANTSEVICH M., LOVKO D. N.** Research on wear resistance and friction coefficient of gas-thermal composite coatings with the addition of nano carbon components without lubricants ..... **30**
- ГОРБУНОВ В. П., ТРОФИМЧУК А. С.** Моделирование смещений от упругих деформаций несущей системы горизонтального фрезерно-расточного станка с ЧПУ ..... **35**
- ГРИГОРЬЕВ В. Ф., ДАКАЛО Ю. А.** Оценка возможности применения мобильных устройств связи для проверки шумовых характеристик технологического оборудования ..... **39**
- АНТОНЮК В. Е., ЯВОРСКИЙ В. В.** Разработка классификатора колец при использовании процесса кольцераскатки ..... **42**
- ДЕВОЙНО О. Г., КАРДАПОЛОВА М. А., ЛУЦКО Н. И., ЛАПКОВСКИЙ А. С.** Микротвердость мод мультимодального покрытия из разнородных материалов, полученного лазерной наплавкой ..... **45**
- ДАНИЛОВ В. А., СЕЛИЦКИЙ А. Н.** Исследование тепловых явлений при ротационном точении профильных поверхностей с синусоидальным профилем, эксцентрично установленным круглым резцом ... **48**
- ЖОРНИК В. И.** Совершенствование технологии электроконтактного спекания изделий из твердого сплава ..... **51**
- БЕЛЬСКИЙ С. Е., БЛОХИН А. В., ADEL ABDEL BASSET RASHID, MOURTADA SROUR** Повышение механических характеристик литейных алюминиевых сплавов поверхностным упрочнением методом импульсной тепловой обработки ..... **57**
- ОСТРИКОВ О. М., РЮМЦЕВ А. А.** Новый метод использования принципов модульности в конструкции беспилотных летательных аппаратов ..... **59**
- МЕДВЕДЕВ О. А.** Анализ взаимосвязей угловых размеров деталей, формируемых механической обработкой ..... **62**
- МОНТИК С. В., САНЮКЕВИЧ Ф. М., ГОЛОВАЧ А. П.** Оптимизация структуры подразделений организаций автосервиса с использованием имитационного моделирования ..... **69**
- РОГАЧЕВСКИЙ Н. И.** Исследование несущей способности подшипников червячной передачи качения ..... **72**
- НИЗМЕЕВ А. А.** Пути совершенствования оборудования для радиального обжатия ..... **76**
- БАРСУКОВ В. Г., ЛЕЖАВА А. Г., ХВИСЕВИЧ В. М.** Моделирование и расчетная оценка параметров аэродинамического сопротивления при испытаниях материалов на удар по методу падающего шарика ..... **78**
- ГАЛЮЖИН С. Д., ЛОБИКОВА Н. В., ЛОБИКОВА О. М., ГАЛЮЖИН А. С.** Методика определения объема конденсата, образующегося при прохождении удаляемого воздуха через рекуператор вентиляционной установки ..... **83**
- КАПЛУН В. В., ПАВЛОВ П. А., ШТЕПА В. Н., ПРОКОПЕНЯ О. Н.** Ресурсно-процессная модель энергоменеджмента локального объекта с несколькими источниками энергии ..... **86**
- БОБРОВНИК А. И., ФИЛИПОВА Л. Г., ЧИКИЛЕВСКИЙ Я. А.** Высокоточные приводы технологических машин ..... **91**
- СЕМЁНОВ И. Н.** Импульсный метод диагностирования гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей ..... **94**
- ДЕЧКО М. М., СЕРГЕЕВ К. Л., ДУБНОВИЦКИЙ С. К.** Обеспечение качества поверхности коррозионностойкой стали при применении СОЖ на основе отходов масложирового производства ..... **96**
- КУЛЬГЕЙКО М. П., ЛЕПШИЙ А. П., КУЛЬГЕЙКО Г. С.** Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей ..... **100**

## РЕСУРСНО-ПРОЦЕССНАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

**Введение.** Одной из насущных проблем развития экономики является уменьшение потребления энергетических ресурсов, которые, прежде всего, используются в общественном производстве. Существующая практика оперирует только фактическими данными об энергопотреблении за прошедшие периоды, что чрезвычайно затрудняет процесс оперативного анализа и, соответственно, усложняет принятие управленческих решений по оптимальному использованию энергоносителей. Современные подходы в формировании новых принципов оптимального использования энергоресурсов базируются на рассмотрении и решении такого рода задач в режиме реального времени. Динамическое управление энергопотреблением – это инновационный подход к управлению нагрузкой на стороне спроса. Он включает в себя традиционные принципы регулирования энергопотребления (энергоменеджмент) на всех уровнях распределения энергоносителей, представленных в технологическом процессе, объединяет их в интегрированную структуру для одновременно оптимального управления спросом, в первую очередь для снижения пиковой нагрузки. Это достигается с помощью системы, включающей интеллектуальные устройства и распределенные энергоресурсы с высокоразвитыми средствами управления и коммуникационными возможностями, обеспечивающими динамическое управление системой в целом. Компоненты взаимодействуют друг с другом, создавая при этом динамическую интегрированную автоматизированную структуру способную к обучению [1].

Система динамического управления энергопотреблением локального объекта включает четыре основных компонента [2]:

- «умные» источники энергии, объединенные в единый энергетический модуль;
- «умные» и энергоэффективные устройства конечного потребления энергии;
- интеллектуальная система управления энергообеспечением (ИСУЭ);
- адаптивная архитектура интегрированных коммуникаций.

Важно отметить, что токоприемники, средства управления и сценарии реагирования на спрос связаны с техническими возможностями генерации собственными источниками энергии локального объекта (ЛО) [3], которые являются альтернативным энергетическим ресурсом с более низкой стоимостью, по сравнению с центральной энергосистемой. Все эти элементы способствуют согласованию спроса на стороне пользователя, а источники энергии локального объекта могут накапливать или отдавать (продавать) избыточную энергию во внешнюю сеть.

Соответственно, построение адекватных моделей реализации систем мониторинга и управления энергообеспечением в рамках стратегий энергоменеджмента является актуальной и важной задачей.

**Постановка задачи.** С учётом технологических аспектов энергообеспечения промышленных предприятий создать на основе ресурсно-процессного подхода модель энергоменеджмента локального промышленного объекта с несколькими источниками энергии.

**Каплун Виктор Владимирович**, д. т. н., профессор, профессор кафедры электроснабжения им. проф. В. М. Синькова Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, e-mail : [www.wanten@gmail.com](mailto:www.wanten@gmail.com).

Украина, 03041, г. Киев, ул. Героев Обороны, 12, корпус 8.

**Павлов Павел Александрович**, к. физ.-мат. н., доцент, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета; e-mail : [pin2535@tut.by](mailto:pin2535@tut.by).

**Штепа Владимир Николаевич**, к. т. н., доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета; e-mail : [shns1981@gmail.com](mailto:shns1981@gmail.com).

Беларусь, 225710, Брестская область, г. Пинск, ул. Кирова, 24.

**Прокопеня Олег Николаевич**, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета; e-mail : [olegprokorenya@mail.ru](mailto:olegprokorenya@mail.ru).

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

**Материалы и методика исследований.** Традиционно, необходимое количество электроэнергии при установленной мощности производственного оборудования вычисляют по формуле [4]

$$W = \frac{\sum \Pi \cdot \Phi_{\text{ц}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{K_4}, \text{ кВт} \cdot \text{час} \quad (1)$$

где  $\sum \Pi$  – общая мощность оборудования, кВт;  $\Phi_{\text{ц}}$  – фонд времени на выполнение технологического процесса, час/год;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – соответственно коэффициенты использования оборудования по мощности во времени, машинного времени (отношение машинного времени и штучно-калькуляционного), учитывая потери энергии в сетях.

Особенностью расчета по выражению (1) является то, что он не учитывает стоимостную составляющую электроэнергии, является переменной в разных временных интервалах выполнения одного и того же технологического процесса в разные дни, месяцы, сезоны. Суточные дифференцированные тарифы и наличие возобновляемых источников является существенным фактором, влияющим на стоимость энергообеспечения, и вносят значительную погрешность в определение себестоимости конечной продукции.

Как показано в [3], в качестве количественного критерия эффективности энергопотребления целесообразно использовать условный динамический тариф (УДТ). УДТ – интегральный показатель приведенной текущей стоимости энергии перед распределением между потребителями локального объекта (цехами, технологическими узлами и т. д.), который формируется на основе реальной себестоимости энергии каждого из источников, входящих в энергетический модуль ЛО на заданном временном интервале. Условием определения продолжительности действия определенного УДТ является прогноз его неизменности на выбранном временном интервале и вероятность, с которой этот прогноз осуществляется [2]. Вместе с тем, формирование условного динамического тарифа требует создания интеллектуальной системы управления энергопотреблением с заданной емкостью и быстродействием, которая должна быть интегрирована в системы энергообеспечения.

Соответственно, ресурсно-процессный подход рассматривает модель локального объекта как функционирование двух параллельных процессов (рис. 1):

- генерацию, накопление, распределение и потребление энергии;
- сбор, обработку, хранение информации о работе оборудования и состоянии системы энергообеспечения.

Предложенный ресурсно-процессный подход [5] даст возможность усовершенствовать функционирование систем энергообеспечения ЛО, формируя математическое обеспечение оптимизации их функционирования в режиме реального времени на основе УДТ и энергетических характеристик процессов. В связи с дискретным и

комбинаторным характером математических задач такого рода прогресс в их решении может быть достигнут путем использования принципов структурирования, конвейеризации, а также за счет применения математического аппарата и методов анализа дискретных систем и дискретной оптимизации, теории сетевых графов и множеств и алгебры матриц [5].

Предположим, что ЛО может получать электроэнергию от возобновляемых источников (прежде всего ветровых и солнечных установок) и центральной энергосистемы по дифференцированным тарифам. Необходимо выполнить временную дискретизацию процессов собственной генерации и графика электропотребления, определив их оптимальное согласование между собой на основе УДТ локального объекта (разработка так называемого производственного (ассортиментного) задания).

При этом для формирования структуры ИСУЭ как энергоинформационной системы ЛО используем свойство масштабирования параметров микроэнергосистемы (МЭС) и их адаптивной корректировки в режиме реального времени путем прогноза генерации возобновляемыми источниками и имеющимися характеристиками токоприемников ЛО (рис. 2).

Математическая модель интеллектуальной масштабируемой распределенной микросети включает в себя [6]:

$n \geq 2$  – количество источников распределенной генерации электрической энергии;

$p \geq 2$  – количество конечных потребителей электроэнергии;

$s \geq 2$  – количество порций (блоков) структурированных потоков электроэнергии заданной мощности от источников распределенной генерации с учетом фиксированного на определенном временном промежутке УДТ, полученного на основе прогнозирования возможной генерации возобновляемых источников с учетом зонных тарифов внешней сети;

$T = [t_{ij}]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, s}$  – матрицу времён использования на технологические операции электрической энергии  $i$ -м источником из  $j$ -го ценового диапазона;

$C = [c_{ij}]_{n \times s}$  – матрицу стоимости единицы электроэнергии из  $j$ -го ценового диапазона при генерации  $i$ -м источником;

$\varepsilon > 0$  – параметр, характеризующий системное (машинное) время, затрачиваемое МЭС на формирование параллельной передачи электрической энергии от  $n$  источников к  $r$  конечным потребителям.

Будем считать, что взаимодействие конкурирующих источников распределенной генерации электрической энергии с конечными потребителями подчинено следующим условиям:

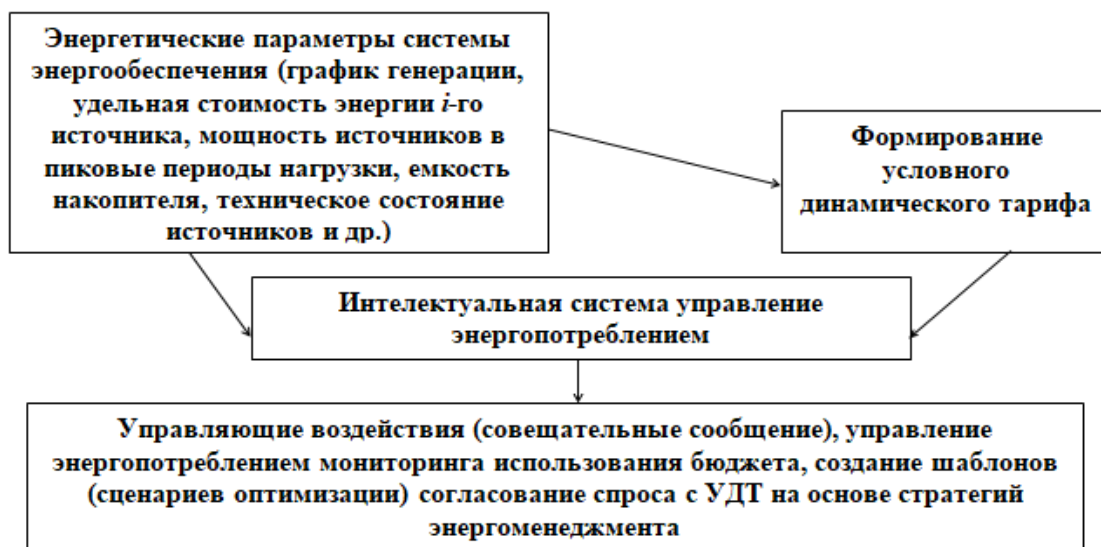


Рисунок 1 – Принципы построения ресурсно-процессной модели энергообеспечения локального объекта с несколькими источниками энергии

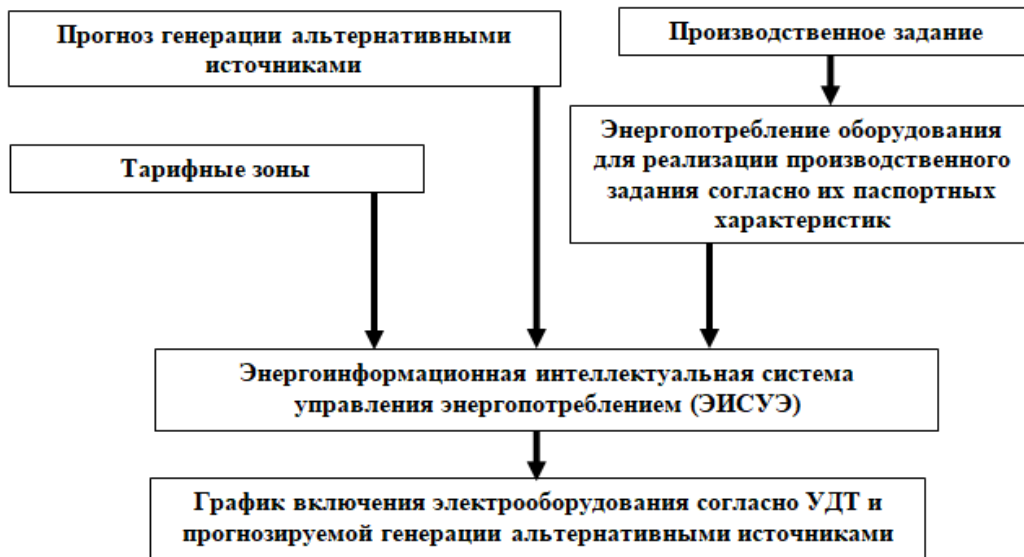


Рисунок 2 – Принцип формирования ИСУЭ как энергоинформационной системы ЛО

- ни один из конечных потребителей не может принимать одновременно более одной порции электрической энергии от источников распределенной генерации;
- передача (прием) каждой порции электроэнергии осуществляется без прерываний;
- распределение порций электрической энергии от источников распределенной генерации конечным потребителям осуществляется циклически по правилу: блок с номером  $j = kp + i, j = \overline{1, S}, i = \overline{1, p}, k \geq 0$ , передается потребителю с номером  $i$ ;
- для каждого конечного потребителя момент завершения получения порции энергии от  $l$ -го источника совпадает с моментом начала получения электрической энергии от  $(l + 1)$ -го источника распределенной генерации,  $l = \overline{1, n - 1}$ .

Вышеуказанные условия определяют синхронный режим, обеспечивающий непрерывное получение электрической энергии всеми конечными потребителями от источников распределенной генерации.

Распределенную МЭС ЛО будем называть неоднородной, если временные промежутки использования электроэнергии конечными токоприемниками различны для разных источников. Получение математических соотношений для вычисления точных значений общего времени выполнения множества параллельных процессов, возникающих при взаимодействии источников распределенной генерации электрической энергии с конечными потребителями МЭС, позволит в реальном времени оптимально управлять любыми сегментами микроэнергосистемы, планировать включения/отключения новых токоприемников, оперативно перераспределять потоки электроэнергии, обрабатывать необходимые массивы информации.

В дальнейшем будем рассматривать  $n \geq 2$  неоднородных распределенных источников, обеспечивающих электропитание  $p \geq 2$  конечных токоприемников, причем распределение электроэнергии происходит блоками  $Q_1, Q_2, \dots, Q_s$ . Анализ электропотребления ЛО будем осуществлять путем формированием УДТ в реальном времени (информационная составляющая энергоменеджмента) и определения присоединенной мощности конечных токоприемников, что позволит реализовать поставленное ассортиментное задание (энергетическая составляющая энергоменеджмента) (см. рис. 2).

Математическая компонента задачи состоит в нахождении минимального общего времени

$T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$  распределения от  $n$  источников к  $p$  токоприемникам при условии непрерывности электропитания [7].

Технологическая компонента задачи заключается в нахождении минимального общего времени использования электроэнергии конечными токоприемниками в условиях обеспечения непрерывности функционирования МЭС ЛО по критерию минимального УДТ.

**Ресурсно-процессное моделирование процессов энергообеспечения локальных производственных объектов.**

В случае, когда число блоков структурированных потоков электрической энергии равно числу конечных потребителей, т. е.  $s = p$ , для нахождения величины  $T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$  получим формулу

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{ij}^e - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^e \right] + \sum_{i=1}^n t_{ip}^e. \quad (2)$$

Здесь  $T = [t_{ij}^e]$  –  $n \times s$ -матрица времен передач блоков электрической энергии  $i$ -м источником из  $j$ -го ценового диапазона с учетом накладных расходов  $\varepsilon$ .

Величины  $\max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{ij}^e - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^e \right], j = \overline{1, p-1}$ , определяют моменты начала передачи электроэнергии источниками потребителям, начиная со второго, а  $\sum_{i=1}^n t_{ip}^e$  – время обеспечения электрической энергией последнего  $p$ -го потребителя всеми источниками.

Рассмотрим случай, когда число конечных потребителей микроэнергосистемы больше числа блоков структурированных энергопотоков ( $s < p$ ). В этом случае выполним разбиение множества потребителей на  $k + 1$  группу по  $s$  потребителей в каждой, т. е.  $p = ks + r, k \geq 1, 1 \leq r < s$ . Если  $p$  не кратно  $s$ , то в последней группе будет только  $r$  потребителей. Результирующая матрица  $RM$  времен передачи электроэнергии источниками конечным потребителям будет состоять из  $k + 1$  матриц  $T^e$ , причем

$$RM = [t_{ij}^e]_{n \times p} = \begin{bmatrix} t_{11}^e & t_{12}^e & \dots & t_{1s}^e & t_{11}^e & t_{12}^e & \dots & t_{1s}^e & \dots & t_{11}^e & t_{12}^e & \dots & t_{1r}^e \\ t_{21}^e & t_{22}^e & \dots & t_{2s}^e & t_{21}^e & t_{22}^e & \dots & t_{2s}^e & \dots & t_{21}^e & t_{22}^e & \dots & t_{2r}^e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1}^e & t_{n2}^e & \dots & t_{ns}^e & t_{n1}^e & t_{n2}^e & \dots & t_{ns}^e & \dots & t_{n1}^e & t_{n2}^e & \dots & t_{nr}^e \end{bmatrix}$$

$k + 1$  матрица будет содержать только  $r$  первых столбцов:

С учетом формулы (2) минимальное общее время обеспечения  $n$  источниками электрической энергии  $p$  конечных потребителей при условии  $s < p$  будет определяться из выражения

$$T_H^2(p = ks + r, n, s, \varepsilon) = kT_H^2(s, n, s, \varepsilon) + kT_H^2(1, n, 1, \varepsilon) + T_H^2(r, n, r, \varepsilon), \quad (3)$$

где

$$T_H^2(s, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{s-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right],$$

$$T_H^2(1, n, 1, \varepsilon) = \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{is}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i1}^\varepsilon \right], \quad (4)$$

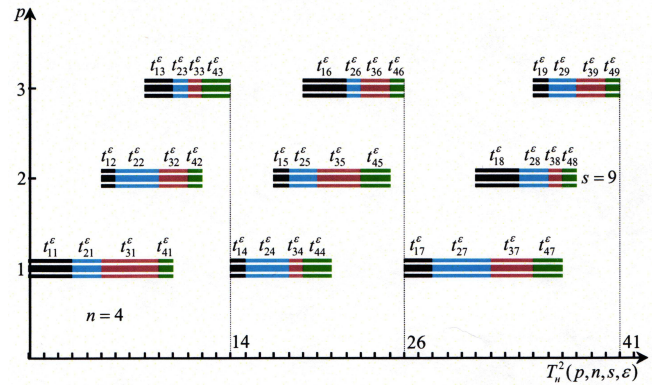
$T_H^2(r, n, r, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{r-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n t_{ir}^\varepsilon$ .

Пусть число блоков структурированных конкурирующих потоков электроэнергии  $s \geq 2$  больше числа конечных потребителей микрорознергосистемы  $p \geq 2$ , т. е. является ограниченным ( $s > p$ ). Тогда произведем разбиение множества блоков на  $k + 1$  группу по  $p$  блоков в каждой, за исключением последней, которая при  $s$  не кратном  $p$  будет содержать  $r$  блоков:  $s = kp + r$ ,  $k \geq 1$ ,  $1 \leq r < p$ . Это равносильно разбиению исходной матрицы времен передачи электрической энергии  $i$ -м источником из  $j$ -го ценового диапазона с учетом системных расходов  $\varepsilon > 0$ .  $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , на  $k + 1$  подматрицу по  $p$  столбцов в каждой, причем подматрица  $k + 1$  в случае, когда  $s$  не кратно  $p$ , будет содержать  $r$  столбцов.

Рассмотрим частный случай, когда  $s$  кратно  $p$ , т. е.  $s = kp$ ,  $k > 1$ . Учитывая, что число блоков больше числа потребителей в  $k$  раз, выполним разбиение множества блоков на  $k$  групп по  $p$  блоков в каждой. Следовательно, исходная матрица времен передачи электрической энергии  $T^\varepsilon$  разобьется на  $k$  подматриц по  $p$  столбцов в каждой. Взаимодействие конкурирующих источников распределенной генерации электрической энергии с конечными потребителями с учетом времен передачи электрической энергии для  $l$ -й группы,  $l = \overline{1, k}$ , можно изобразить в виде линейных диаграмм Ганта [8], каждая из которых отображает во времени передачу  $p$  блоков различных ценовых диапазонов  $n$  конкурирующими альтернативными источниками  $p$  конечным потребителям

$$T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]_{4 \times 9} = \begin{bmatrix} t_{11}^\varepsilon & t_{12}^\varepsilon & \dots & t_{19}^\varepsilon \\ t_{21}^\varepsilon & t_{22}^\varepsilon & \dots & t_{29}^\varepsilon \\ t_{31}^\varepsilon & t_{32}^\varepsilon & \dots & t_{39}^\varepsilon \\ t_{41}^\varepsilon & t_{42}^\varepsilon & \dots & t_{49}^\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 3 & 2 & 1 & 4 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

На рисунке 3 приведены несомещенные диаграммы Ганта для случая  $p = 3$  (токоприемники ранжированы по присоединенной мощности для реализации отдельного сегмента производственного (ассортиментного) задания): 1 – самое большое энергопотребления, 2 – среднее энергопотребление, 3 – минимальное энергопотребление),  $n = 4$  (источники генерации в составе, например, ветровая или солнечная установка, и три тарифных зоны центральной энергосистемы),  $s = 9$  (значение УДТ в определенные промежутки времени реализации производственного (ассортиментного) задания определенной известной мощности).



$t_{11}-t_{19}$  – минимальные УДТ,  $t_{21}-t_{29}$  – вторые по значению УДТ,  $t_{31}-t_{39}$  – третьи по значению УДТ,  $t_{41}-t_{49}$  – четвертые по значению УДТ

Рисунок 3 – Несомещенная диаграмма Ганта

Тогда машинное время  $T_H^2(p = 3, n = 4, s = 9, \varepsilon) = 41$  условные единицы (у. е. – условная мера затрат машинного времени). Если источники с наименьшей ценой на электроэнергию не используются в расчетный период, возможно накопление энергии в аккумуляторных батареях (АКБ). При этом время технологического использования блоков распределения электроэнергии конечным потребителям можно существенно сократить, если воспользоваться приемом совмещения последовательных диаграмм Ганта по оси времени справа налево (рис. 4).

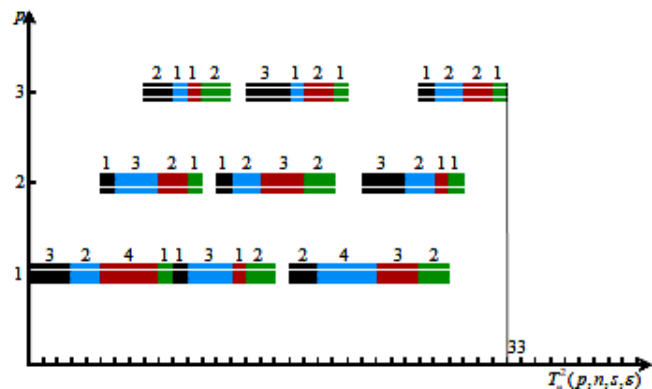


Рисунок 4 – Совмещенная диаграмма Ганта

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

$t_{ij}^{\varepsilon, l} = t_{ij}^l + \varepsilon = t_{i, (l-1)p+j} + \varepsilon$  – времена использования порции электрической энергии из  $j$ -го ценового диапазона  $i$ -м источником в  $l$ -й группе блоков с учетом параметра  $\varepsilon$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, s}$ ,  $l = \overline{1, k}$ ;

$T_l^\varepsilon$  – общее время использования  $l$ -й группы блоков электрической энергии  $p$  потребителям всеми  $n$  источниками  $l = \overline{1, k}$ ;

$E_{ij}^{\varepsilon, l}$  – время завершения использования  $j$ -го блока  $i$ -м источником в  $l$ -й группе блоков,  $l = \overline{1, k}$ .

С учетом формулы (2) для вычисления  $T_l^\varepsilon$  и  $E_{ij}^{\varepsilon, l}$  получим следующие соотношения:

$$T_l^\varepsilon = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon, l} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i, j+1}^{\varepsilon, l} \right] + \sum_{i=1}^n t_{ip}^{\varepsilon, l}, \quad (5)$$



$$E_{ij}^{\varepsilon,l} = \sum_{w=1}^{j-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{q=1}^v t_{qw}^{\varepsilon,l} - \sum_{q=1}^{v-1} t_{q,w+1}^{\varepsilon,l} \right] + \sum_{q=1}^j t_{qj}^{\varepsilon,l}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$j = \overline{1, p}, \quad l = \overline{1, k}.$$

Кроме того, через  $B_{1j}^{\varepsilon,l}$  будем обозначать время начала передачи  $j$ -го блока в  $l$ -й группе первым источником:

$$B_{1j}^{\varepsilon,l} = \sum_{w=1}^{j-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[ \sum_{q=1}^v t_{qw}^{\varepsilon,l} - \sum_{q=1}^{v-1} t_{q,w+1}^{\varepsilon,l} \right], \quad j = \overline{1, p}. \quad (6)$$

Из анализа последовательных диаграмм Ганта (рис. 3, 4) вытекает, что

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = T_n^2(p, n, kp, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^{\varepsilon} - \Omega, \quad (7)$$

где  $T_l^{\varepsilon}$  находится по формулам (4), а величина  $\Omega$  является величиной максимально допустимого суммарного совмещения соседних диаграмм по оси времени. Имеет место следующая лемма.

**Лемма.** Величина  $\Omega$  максимально допустимого суммарного совмещения соседних диаграмм Ганта по оси времени определяется из соотношения:

$$\Omega \geq \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{\cdot}, \omega_l^{\circ}\}, \quad (8)$$

где

$$\omega_l^{\cdot} = \min_{1 \leq j \leq p} \{T_l^{\varepsilon} - E_{nj}^{\varepsilon,l} + B_{1j}^{\varepsilon,l+1}\},$$

$$\omega_l^{\circ} = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \sum_{q=1}^{i-1} t_{q1}^{\varepsilon,l+1} + \sum_{q=i+1}^n t_{qp}^{\varepsilon,l} \right\}, \quad l = \overline{1, k-1}. \quad (9)$$

Здесь  $\omega_l^{\cdot}$  и  $\omega_l^{\circ}$  представляют собой отрезки максимально допустимого совмещения по оси времени  $l$ -й и  $(l+1)$ -й диаграмм.

В формуле (8) стоит знак не строгого равенства, так как каждое значение  $\min\{\omega_l^{\cdot}, \omega_l^{\circ}\}$ ,  $l = \overline{1, k-1}$ , учитывает только величину максимально допустимого совмещения по оси времени между парами соседних диаграмм Ганта, но не всегда учитывает возможные совмещения между идущими подряд группами блоков электроэнергии, передающимися одному и тому же потребителю в двух соседних диаграммах. На рисунках 3 и 4 приведен пример, когда имеет место равенство, а на рис. 5 и 6, когда имеет место неравенство.

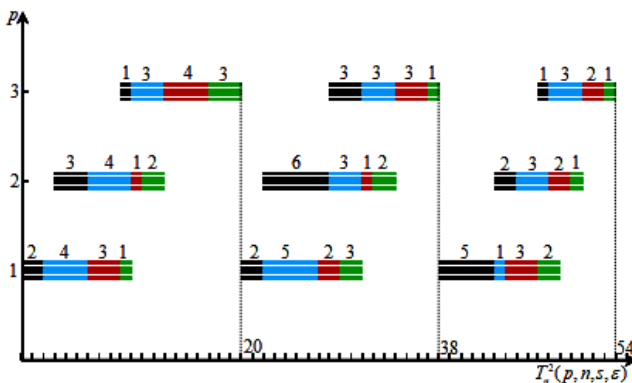


Рисунок 5 – Несовмещенная диаграмма Ганта

С учетом исходных данных, приведенных на рисунках 3 и 4, а также формул (8) и (9) величина  $\Omega$  принимает точное значение уменьшения машинного времени реализации ассортиментной задачи, равное

$$\Omega = \sum_{l=1}^2 \min\{\omega_l^{\cdot}, \omega_l^{\circ}\} = \min\{4, 4\} + \min\{5, 4\} = 8.$$

так как  $\omega_1^{\cdot} = \min_{1 \leq j \leq 3} \{4, 5, 5\} = 4$ ,  $\omega_1^{\circ} = \min_{1 \leq i \leq 4} \{4, 4, 6, 5\} = 4$ ,  
 $\omega_2^{\cdot} = \min_{1 \leq j \leq 3} \{5, 6, 9\} = 5$ ,  $\omega_2^{\circ} = \min_{1 \leq i \leq 4} \{4, 5, 7, 9\} = 4$ .

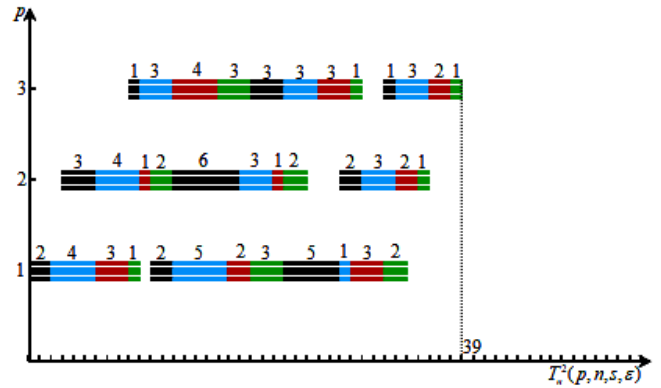


Рисунок 6 – Совмещенная диаграмма Ганта

С учетом исходных данных, приведенных на рисунках 5 и 6, величина  $\Omega$  также определяется из неравенства (7) и равна 14 условным единицам машинного времени. Но, учитывая возможное совмещение групп блоков второй и первой диаграмм, передающихся первому потребителю, появляется дополнительный резерв времени в 1 условную единицу машинного времени для последующего совмещения третьей и второй диаграмм. В результате величина  $\Omega$  суммарного максимально допустимого совмещения составит 15 условных единиц машинного времени.

То есть фактически ЛО имеет потенциальную возможность выполнить все технологические операции на 9,28% эффективнее (рис. 5) при использовании минимального УДТ в качестве критерия ограничения.

Преимуществом использования такого энергоинформационного ресурсно-процессного подхода при планировании энергообеспечения ЛО (на примере промышленного предприятия), является два ключевых фактора повышения эффективности (уменьшение ресурсных затрат) при реализации ассортиментного задания (рис. 7):

- максимальное использование электроэнергии с минимальным УДТ путем согласования графика энергопотребления отдельными технологическими узлами (сетевой технологической карты) согласно паспортным характеристикам оборудования;
- минимальное использование машинного времени технологического оборудования (при ограничениях по реализации производственного (ассортиментного) задания в заранее заданных промежутках времени на потребление мощности (порций (блоков) энергии) с фиксированными УДТ от различных источников генерации).

Теоретическое обоснование предложенного подхода обеспечивает возможность для масштабирования системы в режиме реального времени, в частности, позволяет изменять временную размерность и количество порций (блоков) УДТ, что создает предпосылки для эффективной адаптации предварительно полученного сетевого графика использования технологического оборудования (см. рис. 3–6) с соблюдением ограничений с учетом паспортных характеристик оборудования и производственного (ассортиментного) задания.

**Заключение.** Ключевым недостатком классических подходов определения потребности в энергии промышленных объектов (например, при планировании реализации производственного (ассортиментного) задания) является отсутствие учёта в режиме реального времени стоимостной составляющей электроэнергии (разные источники генерации, различные зонные тарифы).

Для устранения такого недостатка целесообразно применять условный динамический тариф – интегральный показатель приведенной текущей стоимости электроэнергии на основной шине перед распределением между потребителями локального объекта.

При этом, создание ИСУЭ как энергоинформационной системы управления ЛО с использованием подхода масштабирования параметров позволит разрабатывать алгоритмы оптимального энергоменеджмента и управлять процессами собственной генерации (минимальный УДТ и графики энергопотребления с соответствующей адаптивной корректировкой производственного (ассортиментного) задания) в режиме реального времени.

Формирование и адаптация промышленного производственного задания на основе использования ресурсно-процессного моделирования содержит свойство масштабирования результатов и их адаптивной корректировки в режиме реального времени, что фактически позволит предприятию повысить энергоэффективность технологических операций на 5–10% (с учетом нормативного машинного времени) на основе реализации алгоритмов энергоменеджмента с использованием минимальных УДТ.

Перспективным направлением дальнейших исследований энергоменеджмента на основе ресурсно-процессного подхода является создание метода управления энергообеспечением локальных объектов, который бы комплексно обеспечивал:

- максимизацию применения электроэнергии с минимальным УДТ, путем формирования и адаптации графика энергообеспечения отдельных технологических узлов (сетевой технологической карты) согласно паспортным характеристикам оборудования;
- минимизацию машинного времени использования технологического оборудования (ограничивающие факторы: производственные задания и прогнозируемые в определенных промежутках времени значения мощности порций (блоков) энергии с УДТ различных источников генерации).

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Каплун, В. В. Умовний динамічний тариф як критерій ефективності функціонування мікроенергетичних систем локальних об'єктів // Вісник КНУТД. – № 3 (98). – 2016. – С. 52–58.
2. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення: колективна монографія / Кер. кол. авт. і наук. ред. проф. В. В. Каплун. – К. : КНУТД, 2017. – 189 с.
3. Osypenko, V. About the intelligent decision making system for dynamic electricity pricing on renewable microgrids / V. Osypenko, V. Kaplun, proc. of the XII IEEE Int. Conf. CSIT-2017 & Int. Workshop on Inductive Modeling, September 05-08, 2017 – Lviv, Ukraine, Lviv: Publisher "Vezha&Co", 2017. – P. 348–350.
4. Lagorse, J. A Multiagent Fuzzy-Logic-Based Energy Management of Hybrid Systems Industry Applications / J. Lagorse; M. G. Simoes; A. Miraoui / IEEE Transactions on Issue 6. – P. 2123–2129, 2009.
5. Dawei, G. Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus / G. Dawei, J. Zhenhua, L. Qingchun // Journal of Power Sources. – № 1(185). – 2008.
6. Pavlov, P. A. The optimality of software resources structuring through the pipeline distributed processing of competitive cooperative processes / P. A. Pavlov // Contemporary problems of mathematics, mechanics and computing sciences / N. N. Kizilova, G. N. Zholtkevych (eds). – Kharkov : Apostrophe, 2011. – P. 192–204.
7. Pavlov, P. A. The optimality of software resources structuring through the pipeline distributed processing of competitive cooperative processes / P. A. Pavlov // International Journal of Multimedia Technology (IJMT). – 2012. – Vol. 2. – № 1. – P. 5–10.
8. Kovalenko, N. S. Optimal Grouping Algorithm of Identically Distributed Systems / N. S. Kovalenko, P. A. Pavlov // Programming and Computer Software. – 2012. – Vol. 38. – № 3. – P. 143–150.

*Материал поступил в редакцию 17.10.2019*

#### **KAPLUN V. V., PAVLOV P. A., SHTEPA V. M., PROKOPENYA O. N. Resource-process model of local object energy management with several energy sources**

The resource-process of power consumption management model in the micro-energy system for local object is proposed in the paper. It is shown that the task of creation of electric power complexes on the basis of distributed power sources (traditional and renewable) and their intelligent control systems can be solved by synchronizing the implementation given by set the processes, taking into account their structure, baseline and mixed operating modes, generation and consumption electricity control and will ensure the minimization costs associated with forced blocking parallel processes in their distributed processing. The essence of the resource-process approach for dynamic energy management of micro-energy system with several sources of the electricity is to determine the minimum total time optimization of the current receivers composition, which form the load schedule, at the policy terms of the implementation energy supply structuring processes based on the minimum current cost electricity in the selected time interval as an efficiency criterion. The proposed approach will solve the problems of synthesis energy-efficient micro-energy systems for local objects with heterogeneous sources, as well as development algorithms for their optimal control on the basis of synchronization of generation and consumption electricity in real time.

