МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ КОНЕЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Коваленко Н.С.,
доктор физико-математических наук, профессор,
Белорусский государственный университет,

Павлов П.А.,
кандидат физико-математических наук, доцент,
Полесский государственный университет

Одной из насущных проблем развития экономики является уменьшение потребления энергетических ресурсов. Существующая практика оперирует только фактическими данными об энергопотреблении за прошедшие периоды, что 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 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, распределенные энергоресурсы с высокоразвитыми средствами управления и коммуникационными возможностями, обеспечивающими динамическое управление системой в целом. Компоненты системы взаимодействуют, создавая при этом динамическую интегрированную автоматизированную структуру (Каплун В.В., Павлов, Штепа, Каплун Р.В., 2017).

Система динамического управления энергопотреблением включает четыре основных компонента: «умные» источники энергии, объединенные в единый энергетический модуль; «умные» и энергоэффективные устройства конечного потребления энергии; интеллектуальная система управления энергообеспечением (ИСУЭ); адаптивная архитектура интегрированных коммуникаций (Каплун, 2017).

В данной статье построена математическая модель реализации систем мониторинга и управления энергообеспечением, а также получены математические соотношения для вычисления точных значений общего времени выполнения множества параллельных процессов, возникающих при взаимодействии конкурирующих источников распределенной генерации электрической энергии с конечными потребителями.

Постановка задачи. С учетом технологических аспектов энергообеспечения на основе ресурсно-процессного подхода создать модель энергоменеджмента с несколькими источниками энергии.

Как показано в (Каплун, 2017), в качестве количественного критерия эффективности энергопотребления целесообразно использовать условный динамический тариф (УДТ). УДТ – интегральный показатель приведенной текущей стоимости энергии перед распределением между потребителями, который формируется на основе реальной себестоимости энергии каждого из источников, входящих в энергетический модуль на заданном временном интервале. Формирование условного динамического тарифа требует создания интеллектуальной системы управления энергопотреблением с заданной емкостью и быстродействием, которая должна быть интегрирована в систему энергообеспечения.

Предложенный ресурсно-процессный подход (Каплун, Павлов, Штепа, Прокопеня, 2019) даст возможность усовершенствовать функционирование систем энергообеспечения, 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 при условии использования принципов структурирования и конвейеризации, а также за счет применения математического аппарата, методов дискретных систем и дискретной оптимизации, теории расписаний, теории графов, алгебры матриц (Коваленко, Павлов, 2011).

Ресурсно-процессная модель распределенной сети энергоснабжения. Математическая модель интеллектуальной масштабируемой распределенной сети энергоснабжения (Smart Grid) включает:

- $n \geq 2$ – количество источников распределенной генерации электрической энергии;
- $p \geq 2$ – количество конечных потребителей электроэнергии;
- $s \geq 2$ – количество порций (блоков) структурированных конкурирующих потоков электроэнергии от источников распределенной генерации с учетом ценовых диапазонов;
- $T = [t_{ij}]$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,s}$ – матрицу времен передачи 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 время, затрачиваемое Smart Grid на организацию параллельной передачи электрической энергии от n источников p конечным потребителям.

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

1) ни один из источников не может передавать порцию электроэнергии одновременно более чем одному потребителю;

2) ни один из конечных потребителей не может принимать одновременно более одной порции электрической энергии от источников распределенной генерации;

3) передача (прием) каждой порции электроэнергии осуществляется без прерываний;

4) распределение порций электрической энергии от источников распределенной генерации конечным потребителям компьютерной системой 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*;

5) 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, $l = \overline{1,n-1}$.

Условия 1–5 определяют *синхронный режим*, обеспечивающий непрерывное получение электрической энергии всеми конечными потребителями от источников распределенной генерации.

Распределенную сеть энергоснабжения будем называть *неоднородной*, если времена передачи электрической энергии конечным потребителям – разные для разных источников.

Получение математических соотношений для вычисления точных значений общего времени выполнения множества параллельных процессов, возникающих при взаимодействии конкурирующих источников распределенной генерации электрической энергии с конечными потребителями, позволит в реальном времени оптимизировать функционирование Smart Grid, планировать подключение новых объектов, оперативно перераспределять потоки электроэнергии, обрабатывать большие массивы информации.

Будем рассматривать $n \geq 2$ *неоднородных* распределенных источников, которые передают электрическую энергию $p \geq 2$ конечным потребителям, причем передача электроэнергии осуществляется блоками $Q_1, Q_2, ..., Q_s$. Задача состоит в нахождении минимального общего времени $T_н^2(p,n,s,\varepsilon)$ передачи источниками электрической энергии p потребителям в условиях непрерывного обеспечения энергией последних (рис. 1).

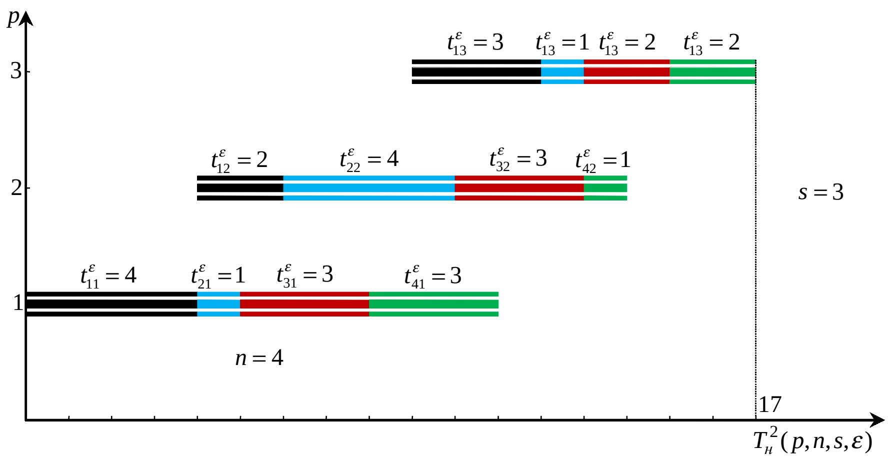

Рис. 1. Синхронный режим взаимодействия распределенных источников электрической энергии и конечных потребителей

Источник: авторская разработка.

Рассмотрим следующие случаи.

а) В случае, когда число блоков структурированных потоков электрической энергии равно числу конечных потребителей, т.е. $s = p$, для нахождения величины $T_{н}^{2}(p,n,s,\varepsilon)$ получим формулу (Павлов, Штепа, 2021):

$$T_{н}^{2}(p,n,s,\varepsilon)=\sum_{j=1}^{p-1}\max_{1\le v\le n}\left[\sum_{i=1}^{v}t_{ij}^{\varepsilon}-\sum_{i=1}^{v-1}t_{i,j+1}^{\varepsilon}\right]+\sum_{i=1}^{n}t_{ip}^{\varepsilon}\ . \tag{1}$$

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

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

б) Рассмотрим случай, когда число конечных потребителей микроэлектросистемы 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. $p=ks+r$, $k\ge 1$, $1\le r<s$. 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^{ε}, причем $k+1$ матрица будет содержать только r первых столбцов:

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

С учетом формулы (1) минимальное общее время обеспечения n альтернативными источниками электрической энергии p конечных потребителей при условии $s < p$ будет определяться из выражения (рис. 2):

$$T_н^2(p = ks + r, n, s, \varepsilon) = kT_н^2(s, n, s, \varepsilon) + kT_н^2(1, n, 1, \varepsilon) + T_н^2(r, n, r, \varepsilon), \tag{2}$$

$$T_н^2(s, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{s-1} \max_{1 \le v \le n} \left[\sum_{i=1}^{v} t_{ij}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon} \right], \quad T_н^2(1, n, 1, \varepsilon) = \max_{1 \le v \le n} \left[\sum_{i=1}^{v} t_{is}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i1}^{\varepsilon} \right], \tag{3}$$

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

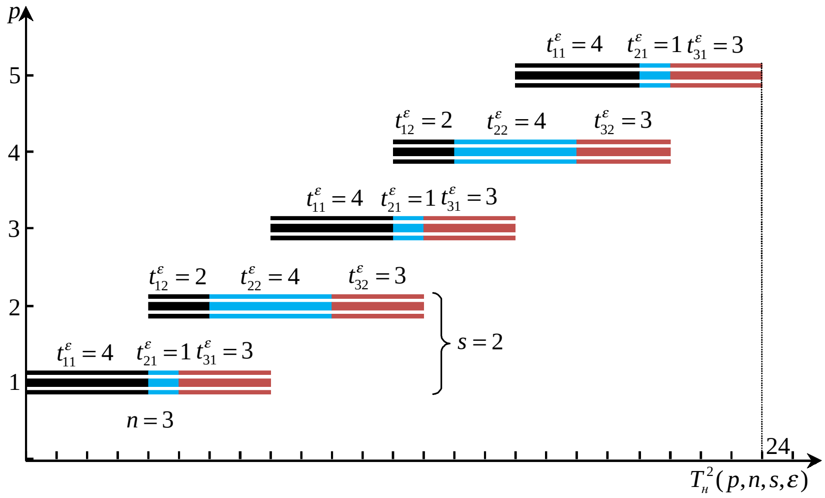

Рис. 2. Функционирование Micro Grid при $p = 5$, $n = 3$, $s = 2$

Источник: авторская разработка.

в) Пусть число блоков структурированных конкурирующих потоков электроэнергии $s \ge 2$ больше числа конечных потребителей микроэнергосистемы $p \ge 2$, т.е. является ограниченным ($s > p$). Тогда произведем разбиение множества блоков на $k+1$ группу по p в каждой, за исключением последней, которая при s не кратно p, будет содержать r блоков: $s = kp + r$, $k \ge 1$, $1 \le r < p$. 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^{ε} 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 диаграмм Ганта, каждая из которых отображает во времени передачу p блоков различных ценовых диапазонов n конкурирующими альтернативными источниками p конечным потребителям.

На рис. 3 приведены несовмещенные диаграммы Ганта для случая $p=3$, $n=4$, $s=9$ и

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

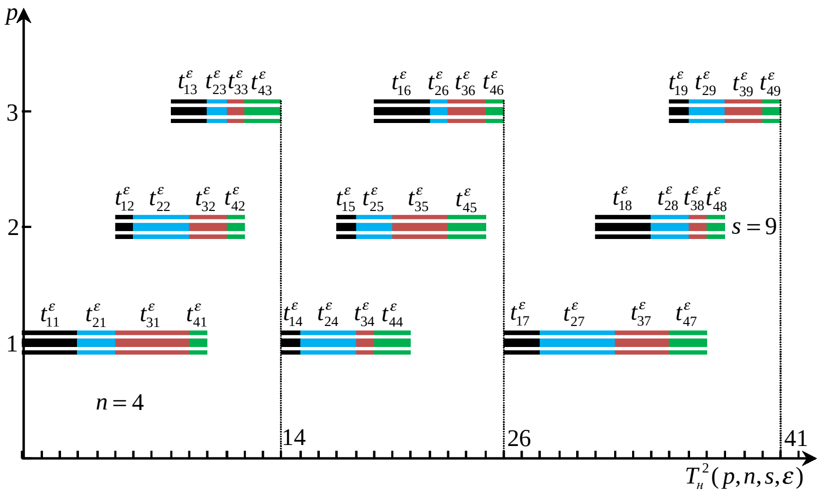

Рис. 3. Несовмещенная диаграмма Ганта

Источник: авторская разработка.

Время $T_н^2(p=3,n=4,s=9,\varepsilon)$ передачи источниками электрической энергии потребителям можно существенно сократить, если воспользоваться приемом совмещения последовательных диаграмм Ганта по оси времени справа налево (рис. 4).

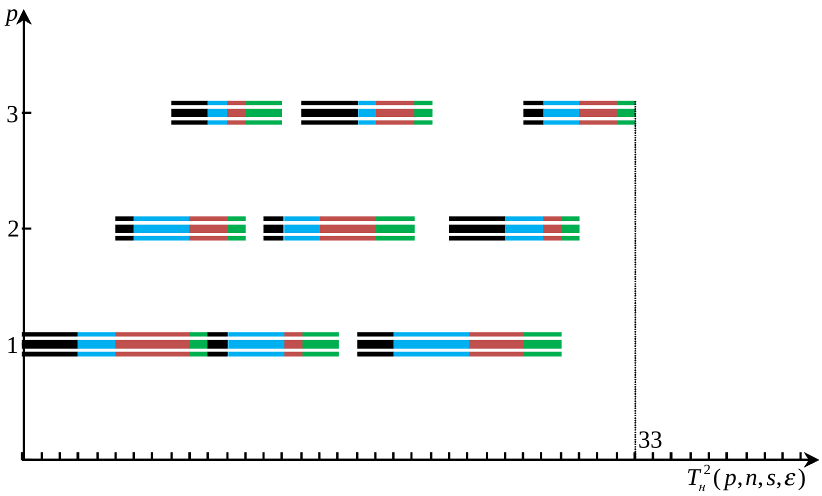

Рис. 4. Совмещенная диаграмма Ганта

Источник: авторская разработка.

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

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

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

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

В силу формулы (1) для вычисления T_l^{ε} и $E_{ij}^{\varepsilon,l}$ получим следующие соотношения:

$$T_l^{\varepsilon} = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1\le v\le n} \left[\sum_{i=1}^{v} t_{ij}^{\varepsilon,l} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon,l} \right] + \sum_{i=1}^{n} t_{ip}^{\varepsilon,l} , \qquad (4)$$

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

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

$$B_{1j}^{\varepsilon,l} = \sum_{w=1}^{j-1} \max_{1\le v\le n} \left[\sum_{q=1}^{v} t_{qw}^{\varepsilon,l} - \sum_{q=1}^{v-1} t_{q,w+1}^{\varepsilon,l} \right], \ j = \overline{1,p} . \qquad (5)$$

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

$$T_{н}^{2}(p,n,s,\varepsilon) = T_{н}^{2}(p,n,kp,\varepsilon) = \sum_{l=1}^{k} T_l^{\varepsilon} - \Omega , \qquad (6)$$

где T_l^{ε} находится по формулам (4), а величина Ω является величиной максимально допустимого суммарного совмещения соседних диаграмм по оси времени.

Лемма (Коваленко, Павлов, 2011). Величина Ω максимально допустимого суммарного совмещения соседних диаграмм Ганта по оси времени определяется из соотношения:

$$\Omega \ge \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{'}, \omega_l^{''}\}, \qquad (7)$$

где

$$\omega_l^{'} = \min_{1\le j\le p}\{T_l^{\varepsilon} - E_{nj}^{\varepsilon,l} + B_{1j}^{\varepsilon,l+1}\}, \ \omega_l^{''} = \min_{1\le i\le n}\left\{ \sum_{q=1}^{i-1} t_{q1}^{\varepsilon,l+1} + \sum_{q=i+1}^{n} t_{qp}^{\varepsilon,l} \right\}, \ l = \overline{1,k-1}. \qquad (8)$$

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

В формуле (7) стоит знак не строгого равенства, так как каждое значение $\min\{\omega_l^{'}, \omega_l^{''}\}$, $l = \overline{1,k-1}$, учитывает только величину максимально допустимого совмещения по оси времени между парами соседних диаграмм Ганта, но не всегда учитывает возможные совмещения между подряд идущими группами блоков электроэнергии, передающихся одному и тому же потребителю в двух соседних диаграммах. На рис. 3 и рис. 4 приведен пример, когда имеет место равенство, а на рис. 5 и рис. 6 – когда имеет место неравенство.

Подставляя далее значение T_l^{ε} из (3) в (6) и в силу леммы, получаем оценку для вычисления $T_н^2(p,n,kp,\varepsilon)$ вида:

$$T_н^2(p,n,kp,\varepsilon) \le \sum_{l=1}^{k} T_l^{\varepsilon} - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{'},\omega_l^{''}\}. \qquad (9)$$

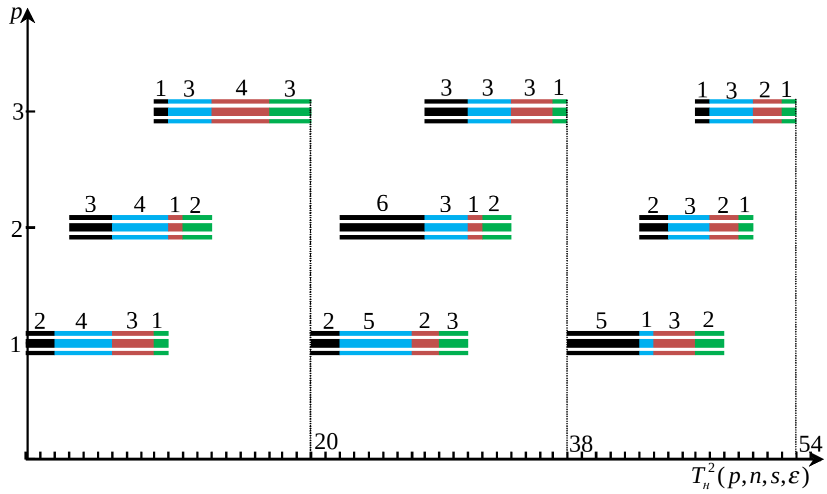

Рис. 5. Несовмещенная диаграмма Ганта

Источник: авторская разработка.

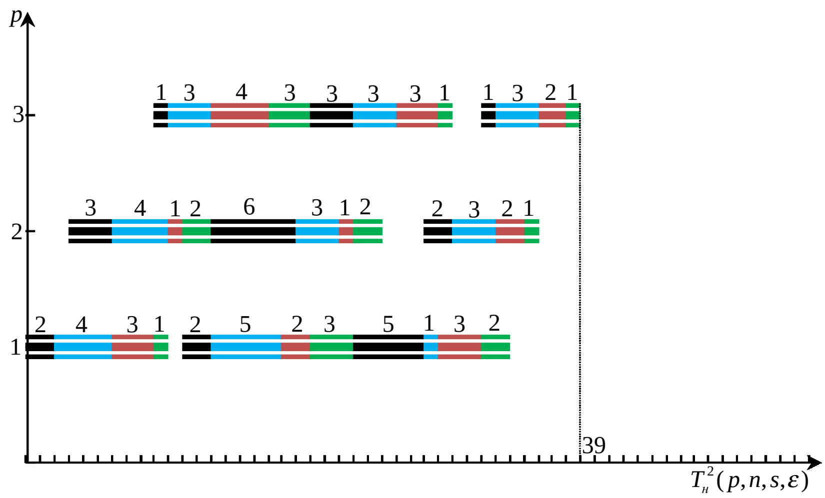

Рис. 6. Совмещенная диаграмма Ганта

Источник: авторская разработка.

Для случая, когда s не кратно p, т. е. $s = kp + r$, $k \ge 1$, $1 \le r < p$, общее время $T_н^2(p,n,kp+r,\varepsilon)$ передачи n источниками электрической энергии p потребителям в условиях второго синхронного режима определяется по формуле:

$$T_н^2(p,n,kp+r,\varepsilon) \le \sum_{l=1}^{k} T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{'},\omega_l^{''}\} - \min\{\omega_k^{'},\omega_k^{''}\}, \qquad (10)$$

где T_{k+1}^ε, $\omega_k^{'}$, $\omega_k^{''}$ находятся по формулам:

$$T_{k+1}^\varepsilon = \sum_{j=1}^{r-1} \max_{1\le v\le n} \left[\sum_{i=1}^{v} t_{ij}^{\varepsilon,k+1} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon,k+1} \right] + \sum_{i=1}^{n} t_{ir}^{\varepsilon,k+1}, \qquad (11)$$

$$\omega_k^{'} = \min_{1\le j\le r} \left\{ T_k^\varepsilon - E_{nj}^{\varepsilon,k} + B_{1j}^{\varepsilon,k+1} \right\}, \;\; \omega_k^{''} = \min_{1\le i\le n} \left\{ \sum_{q=1}^{i-1} t_{q1}^{\varepsilon,k+1} + \sum_{q=i+1}^{n} t_{qp}^{\varepsilon,k} \right\}. \qquad (12)$$

Теорема (Коваленко, Павлов, 2011). В условиях взаимодействия источников распределенной генерации электроэнергии с конечными потребителями во втором синхронном режиме, для любых параметров интеллектуальной масштабируемой неоднородной Smart Grid $p \ge 2$, $n \ge 2$, $s \ge 2$, $\varepsilon > 0$, минимальное общее время $T_н^2(p,n,s,\varepsilon)$ передачи электрической энергии определяется по формулам:

$$T_н^2(p,n,s,\varepsilon) = \sum_{j=1}^{s-1} \max_{1\le v\le n} \left[\sum_{i=1}^{v} t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^{n} t_{is}^\varepsilon \;\text{ при }\; s = p,$$

$$T_н^2(p,n,s,\varepsilon) = kT_н^2(s,n,s,\varepsilon) + kT_н^2(1,n,1,\varepsilon) + T_н^2(r,n,r,\varepsilon) \;\text{ при }\; s < p,$$

$$T_н^2(p,n,s,\varepsilon) \le \begin{cases} \sum_{l=1}^{k} T_l^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{'},\omega_l^{''}\}, \;\; при\; s = kp,\; k > 1, \\ \sum_{l=1}^{k} T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^{'},\omega_l^{''}\} - \min\{\omega_k^{'},\omega_k^{''}\}, \\ при\; s = kp + r,\; k \ge 1,\; 1 \le r < p, \end{cases}$$

где $T_н^2(s,n,s,\varepsilon)$, $T_н^2(1,n,1,\varepsilon)$ и $T_н^2(r,n,r,\varepsilon)$ определяются по формулам (3), T_l^ε – по формуле (4), $\omega_l^{'}$ и $\omega_l^{''}$ – по формулам (8), T_{k+1}^ε – по формуле (11), $\omega_k^{'}$ и $\omega_k^{''}$ – по формулам (12).

Заключение. Создание интеллектуальной системы управления энергопотреблением представляет собой довольно сложную научно-техническую проблему, решение которой связано с созданием системного и прикладного программного обеспечения, развитием алгоритмов и численных методов, математическим моделированием функционирования параллельных систем с целью анализа эффективности и оптимальности их функционирования. В настоящее время в этой области ведутся интенсивные исследования. Однако понимание ряда аспектов, связанных с параллельными системами, находится на интуитивном уровне. Это трудные в математическом отношении проблемы по расчету оптимальных характеристик как самих параллельных энергетических систем, так и характеристик оптимальной организации большого числа одновременно взаимодействующих параллельных процессов, количественная и качественная оценка различных стратегий управления параллельными процессами, включая проблемы синхронизации, проблемы создания эффективных параллельных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения с учетом характеристик конкретных энергетических систем распределенной обработки данных и др.

Л и т е р а т у р а

Каплун В.В. (ред.). 2017. *Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення*. Колективна монографія. Київ : КНУТД. 188 с.

Каплун В.В., Павлов П.А., Штепа В.Н., Каплун Р.В. 2017. Моделирование динамической стоимости электроэнергии в микроэнергетической системе с распределенными источниками в синхронном режиме. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія «Технічні науки». № 3 (110). С. 11–24.

Каплун В.В., Павлов П.А., Штепа В.Н., Прокопеня О.Н. 2019. Ресурсно-процессная модель энергоменеджмента локального объекта с несколькими источниками энергии. *Вестник Брестского государственного технического университета*. № 4 (117). С. 86–91.

Коваленко Н.С., Павлов П.А. 2011. *Математическое моделирование параллельных процессов*. Монография. Saarbrucken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH. 246 с.

Павлов П.А. Штепа В.Н. 2021. Модель непрерывного обеспечения электрической энернией конечных потребителей. *Инжиниринг: теория и практика*. Материалы I Международной заочной научно-практической конференции. Пинск, 26 марта 2021 г. Полесский государственный университет. В.И. Дунай (ред.). С. 31–40.

Zaiets N., Shtepa V., Pavlov P., Elperin I., Hachkovska M. 2019. Development of a resource-process approach to increasing the efficiency of electrical equipment for food production. Eastern-European *Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No 8 (101). P. 59–65.

Статья поступила 14.02.2023 г.