



УДК 620.9.603.13:681.51

С. Е. Саух, д-р техн. наук, **Э. П. Семагина**, канд. техн. наук
Институт проблем моделирования
в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины,
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 4249164, E-mail: saukh@svitonline.com)

Определение равновесного состояния рынка электрической энергии в Украине методами математического моделирования

Предложено математическое описание состояния текущего равновесия рынка электрической энергии в Украине, на котором генерирующие компании продают электроэнергию по договорным ценам и по установленным тарифам. Основу математического описания составляет совокупность взаимосвязанных функциональных выражений, описывающих прибыль каждого участника рынка, подлежащую максимизации. Приведены равенства и неравенства, соответствующие технологическим особенностям работы оборудования. Сформулирована задача поиска равновесного состояния рынка в виде многокритериальной задачи оптимизации с ограничениями. Задача тождественно преобразована в нелинейную смешанную задачу дополненности.

Запропоновано математичний опис стану поточної рівноваги ринку електричної енергії в Україні, на якому генеруючі компанії продають електроенергію за договірними цінами і за встановленими тарифами. Основою математичного опису є сукупність взаємопов'язаних функціональних виразів, що описують прибуток кожного з учасників ринку, який підлягає максимізації. Наведено рівності та нерівності, які відображають технологічні особливості роботи обладнання. Сформульовано задачу пошуку рівноважного стану ринку у вигляді багатокритеріальної задачі оптимізації з обмеженнями. Задачу тотожно перетворено в нелінійну змішану задачу додатковості.

К л ю ч е в ы е с л о в а: рынок электрической энергии, равновесное состояние рынка, математическая модель рынка, многокритериальная задача оптимизации, задача дополненности.

Математическое моделирование рынка электрической энергии Украины позволяет определить его равновесное состояние, при котором цены на электрическую энергию в энергоузлах, объемы производства, передачи и потребления электроэнергии устанавливаются на таком уровне, при котором результаты деятельности каждого из участников рынка в наибольшей степени близки к достижению их целей. Максимизация прибыли является целью деятельности каждого участника рынка электроэнергии в Украине.

Равновесие на конкурентном рынке электроэнергии достигается в условиях действия значительного числа факторов. Рассмотрим наиболее существенные из них.

Поведение на рынке хозяйствующих субъектов. В последние годы изменилась структура рынка электрической энергии: вместо монополиста на рынке появилось несколько участников, организующих свою деятельность в соответствии с индивидуальными критериями оптимальности. К таковым относятся конкурирующие компании-производители, оператор сети, арбитражный торговец и др. Появились крупные частные компании, способные влиять на рынок. Мотивация деятельности участников рынка также изменилась: вместо минимизации производственных расходов основной целью стала максимизация прибыли.

Генерирующие мощности агрегированы по признакам принадлежности к узлу производства, компании-собственнику, технологии производства электроэнергии и типу используемого топлива. Расходные характеристики генераторов описываются выпуклыми кусочно-линейными или квадратичными функциями. При этом пусковые расходы не учитываются.

Тарифицированное производство электроэнергии. На энергорынке Украины одновременно присутствуют крупные конкурирующие производители (теплоэлектростанции) и производители, продающие электроэнергию по регулируемому государством тарифу (АЭС, ГЭС-ГАЭС, ТЭЦ и блокстанции). Поскольку АЭС, ГЭС-ГАЭС, ТЭЦ и блокстанции вместе обеспечивают более половины производства электроэнергии, учет этого фактора является необходимым условием достижения адекватности модели.

Потребители электроэнергии. Их поведение описывается совокупностью графиков нагрузок в узлах электроэнергетической системы и характеризуется линейными зависимостями цен от объемов потребления электроэнергии.

Электрическая сеть. При моделировании характеристик сети электропередач, влияющих на равновесное состояние рынка, приняты следующие упрощения. Потери электроэнергии и реактивные потоки мощности в линиях не учитываются. Связи между региональными энергосистемами представляются агрегированно в виде междузловых интерфейсов. Потоки мощности через интерфейсы удовлетворяют балансовым уравнениям для потоков мощностей в узлах. При описании электрической сети принимается во внимание тот факт, что компании-производители не влияют на ценообразование при оплате услуг по передаче электроэнергии. Передача по междузловым интерфейсам оплачивается только в случае их перегрузки. При этом компании, способствующие перегрузке, штрафуются, а способствующие разгрузке линии — премируются.

Надежное функционирование энергосистемы обеспечивается выполнением следующих общесистемных требований:

- объем горячего резерва, при котором суммарная мощность задействованного оборудования превышает мощность потребления на заданную величину (оптимизация объемов производства электроэнергии и формирование горячего резерва генерирующих мощностей осуществляется посредством его оптимального распределения между производителями);
- выполнение условий ночного минимума нагрузки энергосистемы;
- соблюдение ограничений по мощности для генерирующего оборудования и пропускной способности для межсистемных интерфейсов.

Организация энергорынка. Введение в рынок механизма прямых договоров обуславливает необходимость определения объемов продажи электроэнергии каждым производителем в каждом узле. При этом организованный оптовый рынок потребления электроэнергии формируется введением арбитражной торговли. Функцию арбитражного торговца реализует оператор оптового рынка.

Модель рынка электрической энергии Украины состоит из совокупности моделей поведения отдельных его участников, действующих в соответствии с собственными интересами.

Введем следующие обозначения:

$i \in I$ — индекс множества I узлов электроэнергетической сети;

$f \in F$ — индекс множества F компаний-производителей электроэнергии;

$h \in H(f, i)$ — индекс множества $H(f, i)$ генерирующих мощностей компании f в узле i

$$H(f, i) = \bar{H}(f, i) \cup \tilde{H}(f, i),$$

где подмножества $\bar{H}(f, i)$ и $\tilde{H}(f, i)$ образуют генерирующие мощности, относительно которых соответственно действуют тарифы и применяются рыночные механизмы формирования цены на отпущенную электроэнергию;

$k \in K$ — индекс множества K межузловых интерфейсов;

переменная модели, обозначенная звездочкой, является внешней для модели поведения данного участника, но внутренней для модели рынка в целом.

Модель поведения генерирующей компании на энергорынке.

Цель деятельности генерирующей компании f ($\forall f \in F$) на конкурентном энергорынке заключается в достижении максимальной прибыли [1—4], представляемой в виде

$$\sum_{i \in I} \left[(1 - B_{fi}) \tilde{p}_i^* + B_{fi} P_i \left(a_i^* + \sum_{f \in F} \tilde{s}_{fi} \right) - w_i^* \right] \tilde{s}_{fi} +$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{h \in \tilde{H}(f, i)} [\tilde{p}_r^* r_{fih} - C_{fih}(g_{fih}) + w_i^* g_{fih}] \xrightarrow{\{\tilde{s}_{fi}, r_{fih}, g_{fih}\}} \max, \quad (1)$$

где $-w_i^*$ — удельные выплаты компании f в пользу оператора сети за услугу по передаче ее электроэнергии из хаба в узел i , грн/МВт; $+w_i^*$ — удельные выплаты оператора сети в пользу компании f за передачу в хаб электроэнергии, произведенной в узле i генераторами $h \in \tilde{H}(f, i)$ этой компании, грн/МВт; g_{fih} — объем производства электроэнергии генератором h компании f в узле i , МВт; p_r^* — цена резервирования мощностей в системе, грн/МВт; r_{fih} — резервирование мощности генератора h компании f в узле i , МВт; \tilde{s}_{fi} — объем продажи электроэнергии компанией f в узле i на конкурентном сегменте рынка, МВт; a_i^* — объем продажи электроэнергии арбитражным торговцем в узле i , МВт; $C_{fih}(g_{fih})$ — себестоимость производства электроэнергии в объеме g_{fih} на генераторе h , установленном в узле i компанией f (функции C_{fih} должны быть выпуклыми, обычно они представляются линейными или квадратичными зависимостями); B_{fi} — индекс, значение которого устанавливается в зависимости от того, является ли поведение фирмы f на энергорынке конкурирующим ($B_{fi} = 0$, т.е. поведение по Бертрону) или стратегически осмысленным ($B_{fi} = 1$, т.е. поведение по Курно); \tilde{p}_i^* — цена продажи электроэнергии ее потребителям в узле i , грн/МВт; P_i — обратная функция спроса на электроэнергию в узле i , грн/МВт.

Следует заметить, что наличие слагаемого a_i^* в определении независимой переменной функции $P_i \left(a_i^* + \sum_{f \in F} s_{fi} \right)$ имеет смысл лишь в случае доступа к узлу i арбитражного торговца. Обычно функция P_i представляется приближенно в виде линейной зависимости

$$P_i \left(a_i + \sum_{f \in F} s_{fi} \right) = \alpha_i - \beta_i \left(a_i + \sum_{f \in F} s_{fi} \right).$$

Цель деятельности генерирующей компании $f \in F$ в условиях тарифицированного отпуска электроэнергии также сводится к максимизации прибыли, но в этом случае критериальная функция имеет вид

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{h \in \tilde{H}(f, i)} \bar{p}_{fih} g_{fih} - w_i^* \bar{s}_{fi} \right) + \sum_{i \in I} \sum_{h \in \tilde{H}(f, i)} [p_r^* r_{fih} - C_{fih}(g_{fih}) + w_i^* g_{fih}] \xrightarrow{\{\bar{s}_{fi}, r_{fih}, g_{fih}\}} \max, \quad (2)$$

где \bar{p}_{fih} — тарифы на отпускаемую электроэнергию с генераторов, принадлежащих компании f , в узлах $i \in I$, грн/МВт; \bar{s}_{fi} — объем продажи арбитражным торговцем тарифицированной электроэнергии компании f в узле i .

Принципиальная разница между целевыми функциями (1) и (2) деятельности генерирующих компаний в неконкурентной и конкурентной средах заключается соответственно в отсутствии и наличии текущего влияния потребителей электроэнергии на прибыль компании.

Цель деятельности генерирующей компании, работающей на конкурентном энергорынке в условиях наличия на нем тарифицированной части произведенной электроэнергии. Как правило, на современных энергорынках одновременно действуют рыночные и нерыночные механизмы формирования цен на отпускаемую электроэнергию. Работа генерирующих мощностей на принципиально различных технологиях (использование энергии воды, ветра, биомассы, ядерного и органического топлива) обуславливает несопоставимость их удельных производственных расходов. Поэтому рыночные механизмы ценообразования в первую очередь применяются в отношении родственных и наиболее затратных технологий производства электроэнергии, используемых на тепловых электростанциях.

При условиях одновременного действия рыночных и нерыночных механизмов ценообразования выражение (1) теряет свою адекватность, поскольку в нем не отображается влияние на равновесные цены неконкурирующих производителей электроэнергии, обусловленное их объемами производства и тарифами на электроэнергию.

Сформулируем цель деятельности генерирующей компании f ($\forall f \in F$), работающей в условиях одновременного действия рыночных и нерыночных механизмов формирования цен на отпускаемую электроэнергию. Для этого, прежде всего, сделаем следующие предположения. Пусть переменная \bar{k} означает часть отпуска тарифицированной электроэнергии в общем объеме ее отпуска всеми генерирующими компаниями, а переменная \bar{p} — средний тариф на всю отпускаемую по различным тарифам электроэнергию. Введенные переменные \bar{k} и \bar{p} удовлетворяют очевидным соотношениям

$$\bar{k} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \bar{s}_{fi}, \quad (3)$$

$$\bar{p} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} \bar{p}_{fih} g_{fih}. \quad (4)$$

Особенности механизма ценообразования на энергорынке Украины следующие: оптовая цена p^* на электроэнергию, отпускаемую потребителям, устанавливается одинаковой во всех энергоузлах, т.е. $p_i^* = p^*$ для

$\forall i \in I$. Цены p_i^* формируются на основе баланса стоимостей электроэнергии, проданной потребителям, и электроэнергии, купленной у производителей. Производители отпускают электроэнергию как по установленным тарифам \bar{p}_{fi} , так и по рыночным ценам \tilde{p}_i^* . Следовательно, баланс стоимостей купленной и проданной электроэнергии можно представить в виде равенства

$$\bar{p} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \bar{s}_{fi} + \sum_{i \in I} \tilde{p}_i^* \sum_{f \in F} \tilde{s}_{fi} = \sum_{i \in I} p_i^* \sum_{f \in F} s_{fi}, \quad (5)$$

где $s_{fi} = \bar{s}_{fi} + \tilde{s}_{fi}$ совокупный объем продажи тарифицированной и нетарифицированной электроэнергии компанией f в узле i , МВт · ч. Учитывая соотношения (3) и (4), представим равенство (5) в виде

$$\sum_{i \in I} \tilde{p}_i^* \sum_{f \in F} \tilde{s}_{fi} = \sum_{i \in I} (p_i^* - \bar{k} \bar{p}) \sum_{f \in F} s_{fi}.$$

Если полагать, что структура совокупной продажи электроэнергии в узлах $i \in I$ одинакова, т.е. доли объемов продаж тарифицированной и нетарифицированной электроэнергии одинаковы для всех узлов $i \in I$ и равны соответственно \bar{k} и $1 - \bar{k}$, то совокупный объем продажи тарифицированной и нетарифицированной электроэнергии на рынке можно представить в виде

$$\sum_{f \in F} s_{fi} = \sum_{f \in F} \tilde{s}_{fi} + \sum_{f \in F} \bar{s}_{fi} = (1 - \bar{k}) \sum_{f \in F} s_{fi} + \bar{k} \sum_{f \in F} s_{fi},$$

или

$$\sum_{f \in F} \tilde{s}_{fi} = (1 - \bar{k}) \sum_{f \in F} s_{fi}.$$

Отсюда получим следующее соотношение между рыночными ценами \tilde{p}_i^* и средним тарифом \bar{p} на электроэнергию, продаваемую компаниями-производителями, и ценами p_i^* для потребителя электроэнергии в узлах $i \in I$:

$$(1 - \bar{k}) \tilde{p}_i^* = p_i^* - \bar{k} \bar{p}. \quad (6)$$

На основании (1) с учетом полученного ценового соотношения (6) целевую функцию для генерирующей компании $f \in F$, работающей на конкурентном энергорынке в условиях присутствия на нем тарифицированной оплаты произведенной электроэнергии, запишем в виде

$$\sum_{i \in I} \left[(1 - B_{fi}) \frac{p_i^* - \bar{k} \bar{p}}{1 - \bar{k}} + B_{fi} \frac{P_i \left(a_i^* + \sum_{f \in F} s_{fi} \right) - \bar{k} \bar{p}}{1 - \bar{k}} - w_i^* \right] \tilde{s}_{fi} +$$

$$+ p_r^* \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} r_{fih} - \sum_{i \in I} \overrightarrow{\{\tilde{s}_{fi}, r_{fih}, g_{fih}\}_{h \in \tilde{H}(f, i), i \in I}} \rightarrow \max.$$

Деятельность каждой генерирующей компании осуществляется в условиях

- ограничений на объем производства электроэнергии в узле i генератором h , принадлежащим компании f :

$$g_{fih} + r_{fih} \leq G_{fih}^{\max}, \quad g_{fih} + r_{fih} \geq G_{fih}^{\min} = C_{fih}^G G_{fih}^{\max};$$

- ограничений на объем резервирования мощности генератора $h \in \tilde{H}(f, i)$, принадлежащего компании f в узле i (предельные объемы горячего резерва мощности определяются коэффициентом резервирования $C_{fih}^R \geq 0$):

$$r_{fih} \leq C_{fih}^R g_{fih};$$

- ограничения объемов производства электроэнергии до минимального уровня G^N для группы генераторов $h \in \tilde{H}(f, i)$, которые по условиям эксплуатации не прекращают работу в периоды ночного уменьшения производства:

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i) \setminus \tilde{H}(f, i)} \{C_{fih}^N g_{fih} + \sigma(-C_{fih}^N) G_{fih}^{\min}\} \leq G^N,$$

где значение коэффициента $C_{fih}^N \in \{0, 1\}$, равное нулю, означает принадлежность, а равное единице — непринадлежность генератора h к указанной группе; $\sigma(\cdot)$ — функция Хевисайда;

- баланса объемов тарифицированной продажи и производства электроэнергии компанией f ,

$$\sum_{i \in I} \bar{s}_{fi} = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih}, \quad f \in F;$$

- баланса объемов нетарифицированной продажи и производства электроэнергии компанией f ,

$$\sum_{i \in I} \tilde{s}_{fi} = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i) \setminus \tilde{H}(f, i)} g_{fih}, \quad f \in F.$$

Модель поведения на энергорынке оператора сети. Цель деятельности оператора сети заключается в достижении максимальной прибыли от оплаты услуг по передаче электроэнергии [1, 2, 4]:

$$\sum_{i \in I} w_i^* y_i \xrightarrow{y_i} \max,$$

где w_i^* — удельные расходы на передачу электроэнергии из хаба в узел i , грн/МВт; y_i — объем электроэнергии, передача которой осуществляется оператором сети из хаба в узел i , МВт.

Деятельность оператора сети осуществляется в условиях ограничений на объемы передачи электроэнергии по линиям электросети [1, 2, 4]:

$$\left| \sum_{i \in I} \Omega_{ik} y_k \right| \leq Y_k^{\max}, \quad k \in K.$$

Здесь Ω — $(I \times K)$ — матрица чувствительности изменений потоков нагрузки линий электропередачи к изменениям несбалансированных потоков мощностей от генерации — потребления электроэнергии в узлах сети $i \in I$; Y_k^{\max} — максимально допустимая нагрузка линии электропередачи, МВт.

Матрицу Ω рассчитывают методом потока нагрузок [5], основанным на законах Ома и Кирхгофа. Полный поток нагрузки представляют активной и реактивной составляющими и рассчитывают методами теории цепей переменного тока. Обычно при приближенном описании сети переменного тока применяют упрощенный вариант метода полной нагрузки в виде соотношений, аналогичных используемым в теории цепей постоянного тока. При этом вводят следующие предположения:

- углы сдвига напряжений δ_i в узлах сети $i \in I$ отличаются на достаточно малую величину: $\sin(\delta_i - \delta_j) \approx \delta_i - \delta_j$, $\cos(\delta_i - \delta_j) \approx 1$;
- активное сопротивление R_k линии $k \in K$ незначительно по сравнению с реактивным сопротивлением X_k : $R_k \ll X_k$;
- график напряжения — гладкий.

При введенных предположениях поток мощности Y_k по линии k в направлении от узла подключения i к узлу j можно описать соотношением

$$Y_k = Y_{i-j} \approx \frac{\delta_{i-j}}{X_k}, \quad (7)$$

где $\delta_{i-j} = \delta_i - \delta_j$ — разность между углами сдвига напряжения в узлах i и j , к которым подключена линия k .

Уравнения вида (7) вместе с балансовыми уравнениями потоков мощностей в узлах сети образуют линейную алгебраическую систему уравнений, решение которой позволяет определить потоки мощностей в линиях Y_k через несбалансированные узловы потоки мощностей

$$y_i = a_i + \sum_{f \in F} \left(s_{fi} - \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih} \right),$$

которые определяются разностью между объемом генерации $\sum_{f \in F} \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih}$ и объемом потребления $a_i + \sum_{f \in F} s_{fi}$ электроэнергии в каждом узле $i \in I$.

В матрично-векторной форме соотношения между векторами потоков мощностей в линиях \mathbf{Y} , несбалансированными узловыми потоками мощностей \mathbf{y} и углами сдвига напряжения в узлах $\boldsymbol{\delta}$ имеют вид

$$\mathbf{Y} = (\Psi A) \boldsymbol{\delta}, \quad \mathbf{y} = (A^T \Psi A) \boldsymbol{\delta},$$

откуда $\mathbf{Y} = \Omega \mathbf{y}$, $\Omega = \Psi A (A^T \Psi A)^{-1}$, где A — $(K \times (I-1))$ -матрица, образуемая из $(K \times I)$ -матрицы инцидентности сети удалением в ней произвольного столбца; Ψ — $(K \times K)$ -диагональная матрица, ненулевые элементы которой определяются проводимостями линий

$$\Psi = \text{diag} \left[\frac{X_k}{X_k^2 + R_k^2} \right].$$

Модель поведения на энергорынке арбитражного торговца. Цель деятельности арбитражного торговца заключается в достижении максимальной прибыли от оплаты услуг [1, 2],

$$\sum_{i \in I} (p_i^* - w_i^*) a_i \xrightarrow{a_i} \max,$$

при условии соблюдения им баланса объемов купли-продажи электроэнергии:

$$\sum_{i \in I} a_i = 0,$$

где p_i^* — цена электроэнергии в узле, грн/МВт; w_i^* — удельные расходы на передачу электроэнергии объемом a_i от узла-хаба в узел i , грн/МВт. Величина a_i может быть как положительной, так и отрицательной.

Модель поведения конечного потребителя электроэнергии. Цель деятельности конечного потребителя электроэнергии заключается в достижении им максимального благосостояния, т.е.

$$[\xi_i(S_i) - p_i^* S_i] \xrightarrow{S_i} \max,$$

где $S_i = a_i^* + \sum_{f \in F} s_{fi}$ — объем потребленной электроэнергии (МВт) в узле i стоимостью $p_i^* S_i$ (грн); $\xi_i(S_i)$ — функция полезности объема потре-

ния электроэнергии [1, 2],

$$\xi_i(S_i) = P_i \left(a_i^* + \sum_{f \in F} s_{fi} \right) S_i.$$

Условия сопряжения (клиринга) переменных в моделях агентов энергорынка. Неизвестные переменные в моделях отдельных агентов рынка электрической энергии должны быть согласованы по ценам:

$$p_i^* = P_i \left(a_i^* + \sum_{f \in F} s_{fi} \right), \quad i \in I,$$

по объемам купли-продажи электроэнергии: $a_i^* = a_i$, $i \in I$; по потокам мощностей в узлах:

$$y_i = a_i + \sum_{f \in F} \left(s_{fi} - \sum_{h \in H(f, i)} g_{fih} \right), \quad i \in I.$$

Общие требования к объемам горячего резервирования мощностей в системе:

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} r_{fih} \geq C^{RH} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} s_{fi},$$

где C^{RH} — коэффициент горячего резервирования; к объемам холодного резервирования мощностей в системе:

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{h \in H(f, i)} G_{fih}^{\max} \geq C^{RH} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} s_{fi},$$

где C^{RH} — коэффициент холодного резервирования ($C^{RH} > 1$).

Выводы

В отличие от существующих [1, 2, 4], предложенное математическое выражение для прибыли генерирующей компании позволяет учесть не только тип конкурентной борьбы между компаниями (совершенной конкуренции (по Бертрону) или олигополистичной конкуренции (по Курно)), но и специфику функционирования рынка, в частности присутствие на нем генерирующих компаний, отпускающих электроэнергию по установленным тарифам.

Состояние равновесия рынка электроэнергии в Украине определяемое в результате решения сформулированной многокритериальной задачи опти-

мизации, позволяет установить объемы производства электроэнергии, размещение объемов и цену горячего резерва мощности, цены и объемы продажи электроэнергии в узлах сети, потоки мощности в межузловых интерфейсах, объемы купли-продажи электроэнергии арбитражным торговцем.

A mathematical description is proposed for the state of current equilibrium of electric power market in Ukraine, where generating companies sell electric power at low prices and according to statutory tariffs. The aggregate of interrelated functional expressions, which describe the income of each market participant subject to minimization, are the basis of the mathematical description. Equalities and inequalities, corresponding to technologic peculiarities of equipment operation are presented. A problem of retrieval of the equilibrium market state has been formulated in a form of multicriterion optimization problem with constraints. The problem is transformed identically into nonlinear mixed problem of additiveness.

1. *Hobbs B. F.* LCP models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and POOLCO-based Power Markets // IEEE Transactions on Power Systems. — 2001. — Vol. 16, № 2. — P. 194—202.
2. *Hobbs B., Helman U.* Complementarity-Based Equilibrium Modeling for Electric Power Markets // Modeling Prices in Competitive Electricity Markets. Series in Financial Economics. — Chichester : Wiley, 2004. — 338 p.
3. *Murphy F., Smeers Y.* Generation capacity expansion in imperfectly competitive restructured electricity markets // Operations Research. — 2005. — Vol. 53, № 4. — P. 646—661.
4. *Pineau P.-O.* Electricity market reforms: Industrial developments, investment dynamics and game modeling: Ph. D. Thesis / Pierre-Olivier Pineau. — Montreal, 2000. — 199 p.
5. *Delarue E., Bekaert D., Belmans R., D'haeseleer W.* Development of a comprehensive electricity generation simulation model using a mixed integer programming approach // Proc. of the International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering. — Prague, July 27—29, 2007. — P. 99—104.

Поступила 18.01.10

САУХ Сергей Евгеньевич, д-р техн. наук, гл. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. В 1978 г. окончил Киевский ин-т инженеров гражданской авиации. Область научных исследований — численные операторные методы решения дифференциальных уравнений, декомпозиционные и итерационные методы решения линейных систем большой мерности, математическое моделирование технологических процессов в энергетике и газотранспортных системах, экономико-математические методы моделирования финансовых и макроэкономических процессов.

СЕМАГИНА Эвелина Петровна, канд. техн. наук, зав. отделом моделирования задач теоретической электротехники Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. В 1958 г. окончила Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы математического моделирования задач электротехники и энергетики.

