

С. В. ШЕВЧЕНКО, А. А. ЭГОЯНЦ

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Предлагаются методы формирования планов производства электроэнергии с учетом задаваемой динамики изменения состояния основных производственных ресурсов энергосистемы. На основе применения разработанных математических моделей и алгоритмов управления состоянием энергоблоков энергосистемы определяются распределения объемов генерации и поставок электроэнергии, а также формируются графики работы отдельных энергоблоков, обеспечивающих производство электроэнергии в соответствии с требуемыми объемами потребления. Результаты работы могут быть использованы в составе задач функциональной структуры подсистемы диспетчерского управления энергосистемой.

Ключевые слова: электроэнергия, энергосистема, изменение состояний, критерий, модель, оптимизация, алгоритм, анализ.

Введение. Переход к рыночным отношениям в сфере производства, поставок, транспортировки и потребления электроэнергии приводит к необходимости рассмотреть ряд новых задач в управлении, решение которых позволит создать условия для повышения эффективности в электроэнергетике. Это задачи формирования процедур управления рыночными механизмами регулирования соотношений спроса и предложений, задачи совершенствования решения задач диспетчерского управления, задачи перспективного планирования и др. Подобные вопросы рассматривались в работах [1–4]. Однако задачи формирования целостной стратегии организации эффективного управления в электроэнергетике рассмотрены не полностью. Работа посвящена совершенствованию управления на базовом уровне – на уровне управления объемами генерации электроэнергии отдельными энергоблоками генерирующих предприятий в составе энергосистемы.

Постановка задачи. В соответствии с условиями рыночной экономики в электроэнергетике особенно острыми становятся вопросы поддержки эффективности производства электроэнергии, ее распределения и потребления. Данные долгосрочных, среднесрочных, краткосрочных контрактов и контрактов, заключенных по результатам торгов на балансирующем рынке, а также оперативный учет состояний субъектов производства, поставок и распределения электроэнергии могут быть использованы для повышения эффективности текущего планирования, распределения объемов производства электроэнергии между генерирующими компаниями, их энергоблоками в виде формирования эффективного плана-графика нагрузки для каждого энергоблока.

В целом, все процессы планирования и оперативного управления должны увязываться в единую систему в соответствии с принимаемой иерархией процессов управления, рис. 1.



Рис. 1 – Иерархия процессов управления

Для решения выделенных задач должны быть собраны данные о состоянии и возможностях маневрирования объемами производства всех генерирующих и поставляющих компаний на всех уровнях, а также оценки задержек реализации основных функций, связанных с производством и потреблением конечной продукции.

Учитывая различные динамические характеристики указанных процессов и выполняющих их субъектов производственной деятельности, а также текущие и плановые состояния, данные задачи должны рассматриваться в динамике изменений всех перечисленных факторов и показателей.

Решения в такой постановке позволяют формировать планы производства и поставок электроэнергии на следующий промежуток времени (например, сутки), которые максимально соответствуют реальным обстоятельствам и обладают более высокой эффективностью с позиций использования доступных ресурсов.

Основным критерием при этом следует считать минимальные затраты на обеспечение сбалансированного и окупаемого спроса экономически рентабельным производством и поставками электроэнергии.

Предлагаемые ранее и используемые процедуры в составе принятых методик не учитывают динамические особенности источников и производителей потребляемой электроэнергии, применение которых в

последующих схемах управления может стать ключевым фактором для повышения эффективности функционирования всей энергосистемы.

Учет динамических свойств объекта управления оказывает существенное влияние на эффективность процессов управления [5]. Будем считать, что состояние объекта управления описывается вектором $Q(t_i)$, компоненты которого представляют собой числовые и качественные характеристики состояния объекта управления в момент времени $t_i \in T$. Переход объекта управления в состояние $Q(t_n)$ в момент времени t_n , $t_n \geq t_i$, может быть следствием воздействия управляющих параметров, образующих совокупность векторов $Y = \{Y(t_i)\}$, и результатом выполнения существующих процессов в составе системы [6]. Переход может быть представлен в виде:

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t_i), Y), \quad (1)$$

где $F()$ – построенная функция, идентифицирующая изменение состояния объекта управления под воздействием результатов выполнения выделенных процессов, учитываемых факторов и управляющих значений.

В таком случае, целью оптимального управления можно считать формирование временной последовательности таких значений управляющих параметров, которые обеспечивают переход объекта управления в

требуемое состояние с учетом значений выбранного критерия оптимальности. Процедуры оптимизации управления могут быть построены с использованием векторного критерия оптимальности или с построением множества эффективных решений и применением процедур многокритериальной оптимизации в зависимости от содержания и согласованности выбранных критериев.

Введем следующие обозначения.

Пусть $\Omega(t_i)$ – множество, определяющие целевые состояния объекта управления на момент времени принятия решения $t_i \in T$; $R_0(t_i)$ – доступные ресурсы для перевода объекта управления в целевое состояние; $Y_0(t_i)$ – множество допустимых значений управляющих параметров.

Тогда, если задать в качестве критерия оптимальности вектор $E(Q(t_n), Q(t_i), Y)$, компоненты которого определяют характеристики перехода объекта управления в новое целевое состояние, то рассматриваемая задача оптимального управления может быть представлена в следующем виде.

Для заданного момента времени $t_i \in T$ найти совокупность векторов $Y = \{Y(t_i)\}$, обеспечивающих

$$E(Q(t_n), Q(t_i), Y) \rightarrow opt \quad (2)$$

при ограничениях

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t_i), Y), \quad (3)$$

$$Q(t_n) \in \Omega(t_i), \quad (4)$$

$$R(Q(t_n), Q(t_i), Y) \leq R_0(t_i), \quad (5)$$

$$Y(t_i) \in Y_0(t_i). \quad (6)$$

Здесь функция $R(Q(t_n), Q(t_i), Y)$ определяет требуемые ресурсы для перехода объекта управления в целевое состояние.

Применение рассматриваемой концепции управления производственными системами было рассмотрено на примере организации управления в электро-энергетической системе, нижний уровень которой предполагает формирование графика нагрузки энергоблоков для

производства электро-энергии в соответствии с заданными объемами ее потребления за некоторый период.

Основным критерием оптимальности был выбран минимум суммарных затрат. Данная задача может быть представлена задачей частично-целочисленного линейного программирования. Аналогичные задачи рассмотрены в работе [6].

Пример расчетов и анализ полученных результатов

Применение рассматриваемой концепции управления состоянием энергоблоков было рассмотрено на условном примере, позволяющем создавать процессы управления для некоторой условной ТЭС в составе электроэнергетической системы, нижний уровень управления которой предусматривает формирование графика производства, поставок и распределения электроэнергии в соответствии с заданным уровнем спроса. Данные спроса представлены в часовом разрезе следующих суток и могут быть результатом всех уровней планирования, включая результаты долгосрочного, краткосрочного, текущего планирования и данные торгов балансирующем рынке.

Для тестовых расчетов были использованы следующие данные о спросе и характеристиках энерго системы, приведенные в табл. 1–2.

Таблица 1 – Спрос на электроэнергию в течение суток

| Время | Объем, МВт*час | Время | Объем, МВт*час | Время | Объем, МВт*час |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 00:00 | 900 | 08:00 | 1800 | 16:00 | 1600 |
| 01:00 | 1050 | 09:00 | 1900 | 17:00 | 1500 |
| 02:00 | 1100 | 10:00 | 1950 | 18:00 | 1500 |
| 03:00 | 1200 | 11:00 | 1900 | 19:00 | 1400 |
| 04:00 | 1500 | 12:00 | 1900 | 20:00 | 1200 |
| 05:00 | 1600 | 13:00 | 1900 | 21:00 | 1100 |

| | | | | | |
|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| 06:0 0 | 1650 | 14:0 0 | 1850 | 22:0 0 | 1000 |
| 07:0 0 | 1700 | 15:0 0 | 1700 | 23:0 0 | 950 |

В табл. 1 указаны рассматриваемые объемы спроса электроэнергии, которые должны быть обеспечены энергосистемой на основании договорных обязательств и используемые для формирования графиков

нагрузки энергоблоков в соответствии с принятыми правилами учета в часовом разрезе для каждых суток.

В табл. 2 приведены значения характеристик энергоблоков ТЭС, используемые для тестирования предлагаемых процедур маневрирования мощностью с учетом динамических характеристик энергоблоков.

Таблица 2 – Характеристики энергоблоков ТЭС

| Характеристика | Энергоблоки ТЭС | | | |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й |
| Мин мощность | 200 | 250 | 200 | 250 |
| Макс мощность | 500 | 550 | 500 | 450 |
| Текущая мощность | 0 | 250 | 300 | 0 |
| Цена | 522 | 450 | 510 | 550 |
| Время пуска час | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Время останова | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Стоимость пуска | 10000 | 12000 | 12000 | 13000 |
| Стоимость | 800 | 500 | 400 | 500 |
| Расход топлива | 371.3 | 372.6 | 373.7 | 374.2 |
| Начальное | 0 | 1 | 1 | 0 |

Результаты решения задачи оптимизации распределения объемов производства по энергоблокам с критерием минимум затрат на пуск, производство и поставку электроэнергии и учетом заданного начального состояния энергоблоков представлены в

виде нагрузки энергоблоков для каждого часа в течение суток.

Графики изменения и значение целевой функции для данных табл. 2 представлены на рис.1.

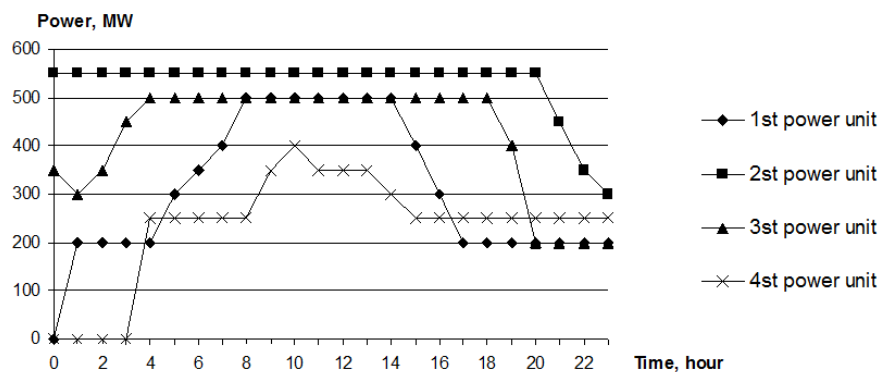


Рис. 2 – Графики нагрузки энергоблоков.
Суммарная стоимость: 17837900 грн.

Как видно из полученных планов-графиков производства (см. рис. 2), 2-й и 3-й блоки находятся в рабочем состоянии и производят электроэнергию в соответствии с уровнем, определенным по решению указанной задачи. При этом 1-й блок включается в момент времени $t = 0$ и

переходит в рабочее состояние при $t = 1$ в соответствии с его характеристиками, см. табл. 2.

Иллюстрация динамики процессов включения и перехода в рабочее состояние для 1-го блока показаны на диаграммах, приведенных на рис. 3.

Отметим, что представленные результаты решения рассматриваемой задачи маневрирования мощностью энергоблоков энергосистемы с учетом динамики изменения их состояний, могут быть использованы для формирования

непосредственных управляющих воздействий, подаваемых на генерирующее оборудование, в контуре систем автоматизированного диспетчерского управления (АСДУ), создавая условия для образования «умных сетей» (Smart-grid) [4, 7, 8].

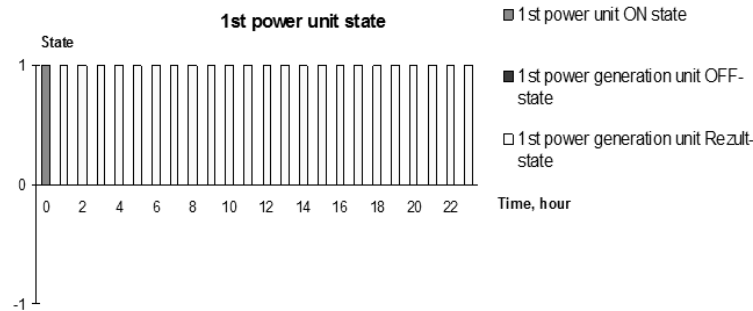


Рис. 3 –График изменения состояния 1-го энергоблока.

Изменения состояний 4-го энергоблока отражены в виде временных диаграмм на рис. 4.

На диаграммах видно, что переход из состояния включения блока в рабочее состояние происходит спустя 4 часа.

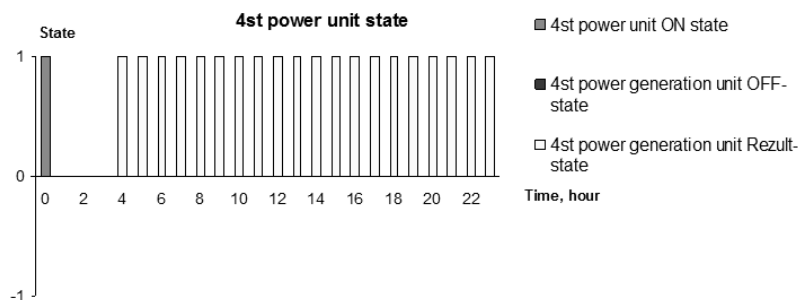


Рис. 4 –График изменения состояния 4-го энергоблока.

Переход 4-го блока в рабочее состояние осуществляется в соответствии с характеристикой длительности пуска согласно данным табл. 2.

которые были выключены в начале рассматриваемого периода.

Для демонстрации учета влияния динамических свойств энергоблоков изменим исходные данные задачи в виде значений времени пуска и останова блоков в соответствии с табл. 3.

Таблица 3 – Изменения данных времени пуска и останова ТЭС

Согласно новым результатам решения задачи, рис. 5, чтобы удовлетворить спрос при заданных условиях эксплуатации, следует использовать 1-й и 4-й энергоблоки,

| Характеристика | Энергоблоки ТЭС | | | |
|----------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1-й э/бл. | 2-й э/бл. | 3-й э/бл. | 4-й э/бл. |
| Время пуска, час. | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Время останова, час. | 1 | 2 | 3 | 4 |

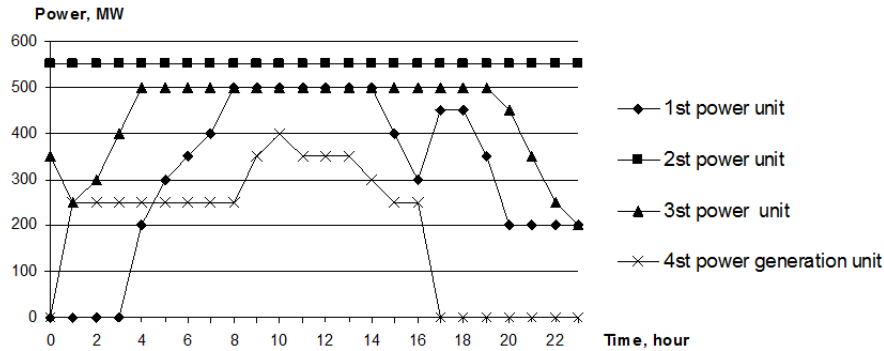


Рис. 5 – Графики нагрузки энергоблоков согласно новому решению.
 Суммарная стоимость: 17 766 000 грн.

Изменения состояний 1-го энергоблока в соответствии с решением задачи по второму варианту, показанные на рис. 6, в точности совпадают с изменениями состояний 4-го

энергоблока по первому варианту решения, показаному на рис. 4. Отличия заключаются в объемах генерации энергоблоков (см. рис. 5).

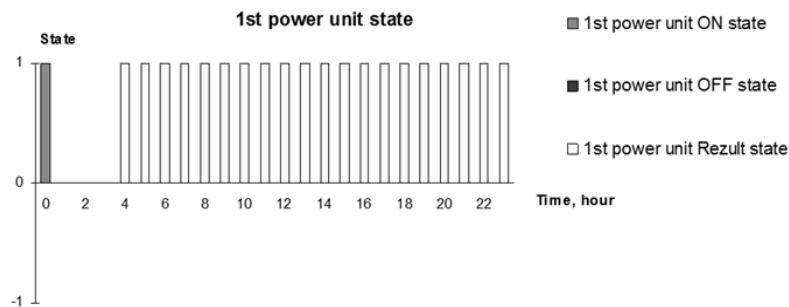


Рис. 6 –График изменения состояния 1-го энергоблока по новому решению.

На рис. 7 приведены изменения состояний 4-го блока по новому решению. При этом, хотя состояние блока изменяется после его включения и выключения, но блок продолжает работать до завершения соответствующих процессов в соответствии с заданными параметрами.

Изменения состояний 4-го энергоблока, согласно решения задачи по второму варианту, после его включения отражают минимальное время перехода блока в рабочее состояние, равное 1-му часу, а также – сохранение рабочего состояния блока в течение 4 часов после выключения.

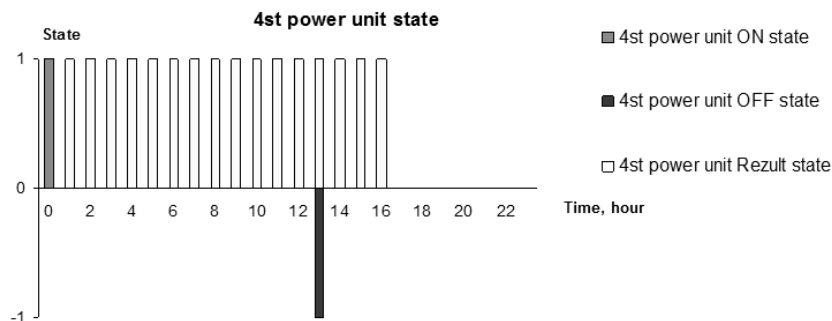


Рис. 7 – График изменения состояния 4-го энергоблока по новому решению.

Почасовые объемы генерации энергоблока, рис. 5. Следует отметить существование зависимости удельной стоимости производства электроэнергии от ее объемов производства. Наличие указанной

зависимости удельной стоимости производства электроэнергии от ее объемов производства. Наличие указанной

зависимости приводит к необходимости выполнять серии расчетов, в которых текущие оценки удельной стоимости производства электроэнергии заменяются фактическими значениями, полученными путем сопоставления всех затрат на производство электроэнергии с его объемами. Так как объемы генерации являются непрерывными величинами, то процесс сходится за конечное число итераций.

Другой аспект влияния на процессы производства электроэнергии – это результаты решения задач управления более высокого уровня. Такие решения непосредственно определяют состав задач, структуру ограничений, значения параметров и ограничений задач управления на нижележащих уровнях.

В целом, приведенные результаты расчетов и их формы представления свидетельствуют о возможности использования разработанных программных решений и их практического применения в процессах текущего планирования производственной мощности энергосистемы с формированием планов-графиков нагрузки энергоблоков и с возможностью проведения исследований вариантов решений.

Помимо этого, совместно с представленной задачей может быть рассмотрена задача минимизации потерь при транспортировке электроэнергии от поставщиков и производителей к потребителям на уровне распределительных сетей.

Выводы. Современное состояние производства, распределения, поставок и потребления электроэнергии требует формирования новых механизмов балансирования платежеспособного спроса, учета непредвиденных нагрузок и предложений производства и поставок с позиций обеспечения их эффективности. Результаты решения формализованного представления этих задач могут быть использованы для формирования графика нагрузки энергоблоков генерирующих компаний с учетом их состояний, объемов, динамики поставок и потребления электроэнергии при составлении долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных контрактов, а также – для

создания современных SMART-сетей в электроэнергетике.

Список литературы: 1. Бурков В. Н., Губко М. В., Новиков Д. А. Организационные механизмы управления в электроэнергетике // Управление развитием крупномасштабных систем. – М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2012. – С. 261–278. 2. Антоненко А. В., Угольницкий Г. А. Модели мотивационного управления в электроэнергетике и проблемы их идентификации / Управление большими системами. Выпуск 47. М. : ИПУ РАН, 2014. – С. 92–124. 3. Hasani M., Hosseini S. H. Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms // Energy. – 2011. – № 36. – P. 277–293. 4. Воронай Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3. – С. 11–15. 5. Шевченко С. В. Распределение объемов производства и поставок электроэнергии с учетом состояния субъектов энергосистемы // Открытое образование. – 2011. – № 2 (86). Ч. 2. – С. 234–238. 6. Шевченко С. В., Пивненко А. М. Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы // Вісник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 67. – С. 196–202. 7. Smart Grids European Technology Platform. Режим доступа: <http://www.smartgrids.eu>. Дата обращения: 28 декабря 2015. 8. Костров Д. Умные сети электроснабжения [smart grid] и проблемы с кибербезопасностью // Информационная безопасность. – 2014. – № 3. – С. 45–47.

Bibliography (transliterated): 1. Burkov, V. N., M. V. Gubko and D. A. Novikov. "Organizacionnye mehanizmy upravlenija v jelektrojenergetike." *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem*. Moscow: Fizmatlit, 2012. 261–278. Print. 2. Antonenko, A. V., and G. A. Ugolnizkiy. "Modeli motivacionnogo upravlenija v jelektrojenergetike i problemy ih identifikacii." *Upravlenie bol'shimi sistemami*. No. 47. Moscow: IPURAN, 2014. 92–124. Print. 3. Hasani M., and S. H. Hosseini. "Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary

capacity mechanisms." *Energy* 36 (2011): 277–293. Print. **4.** Voropay, N. I. "Intellektual'nye jelektrojenergeticheskie sistemy: koncepcija, sostojanie, perspektivy." *Avtomatizacija i IT v jenergetike* 3 (2011): 11–15. Print. **5.** Shevchenko, S. V. "Raspredelenie ob#emov proizvodstva i postavok jelektrojenergii s uchetom sostojanija sub#ektov jenergosistemy." *Otkrytoe obrazovanie* 2(86).2 (2011): 234–238. Print. **6.** Shevchenko, S. V., and A. M. Pivnenko. "Formirovanie planov proizvodstva jelektrojenergii s uchetom dinamiki izmenenija sostojanija jenergosistemy." *Visnyk NTU «HPI»*. No. 67. 2010. 196–202. Print. **7.** *Smart Grids European Technology Platform*, 2015. Web. 12 December 2015 <<http://www.smartgrids.eu>>. **8.** Kostrov, D. "Umnye seti jelektrosnabzhenija [smart grid] i problemy s kiberbezopasnost'ju." *Informacionnaja bezopasnost'* 3 (2014): 45–47. Print.

Поступила (received) 05.12.2015