

7. Ким Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 216 с. 8. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 384 с. 9. Melanie M. An introduction to genetic algorithms / M. Melanie. – London: A Bradford Book, The MIT Press, 1999. – 158 p. 10. Gallant S. Neural Network Learning and Expert Systems / S. Gallant. Cambridge, MA: The MIT Press, 1993. – 364 p. 11. Інформаційні технології в охороні здоров'я і практичній медицині / За ред. О. П. Мінцера. – К. : Вища школа, 2003. – 350 с. 12. Качмар В. О. Медичні інформаційні системи – стан розвитку в Україні / В. О. Качмар // Український журнал телемедицини та медичної телематики. – 2010. – № 8(1). – С. 12–17. 13. Знаменська М. А. Інформатизація закладів охорони здоров'я як основа ефективних комунікацій в системі охорони здоров'я / М. А. Знаменська, Г. О. Слабкий // Медична інформатика та інженерія. – 2015. – № 2. – С. 85–88. 14. Topol E. J. Textbook of cardiovascular medicine / E. J. Topol. – Lippincott Williams & Wilkins, 2002. – 2237 p. 15. Бондаренко М. Ф. Мозгоподобные структуры: Справочное пособие. Том первый / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко / Под ред. акад. НАН Украины И. В. Сергиенко. – К. : Наукова думка, 2011. – 460 с.

Novocherkassk: Ros. gos. tehn. un-t., Red. zhurnal "Izv. vuzov. Elektromekhanika", 2002. Print. 4. Averkin, A. N., et al. *Nechetkie mnozhestva v modelyah upravleniya i iskusstvennogo intellekta*. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. Print. 5. Turban, E. *Decision support and expert systems: management support systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1995. Print. 6. Gaydyshchev, I. *Analiz i obrabotka dannyh: spetsialnyy spravochnik*. St. Petersburg: Piter, 2001. Print. 7. Kim, Dzh.-O., Ch. U. Myuller, and U. R. Klekka. *Faktornyiy, diskriminantnyiy i klasternyy analiz*. Moscow: Finansyi i statistika, 1989. Print. 8. Barsegyan, A. A., et al. *Tehnologii analiza dannyh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP*. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2007. Print. 9. Melanie, M. *An introduction to genetic algorithms*. London: A Bradford Book, The MIT Press, 1999. Print. 10. Gallant, S. *Neural Network Learning and Expert Systems*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1993. Print. 11. Mintsera, O. P., ed. *Informatsiyi tehnologiyi v ohoroni zdorov'ya i praktichniy meditsini*. Kiev: Vischa shkola, 2003. Print. 12. Kachmar, V. O. "Medichni informatsiyi sistemi – stan rozvitku v Ukraini". *Ukrayinskiy zhurnal teleditsini ta medichnoyi telematiki*. No. 8.1. 2010. 12–17. Print. 13. Znamenska, M. A., and G. O. Slabkiy. "Informatizatsiya zakladiv ohoroni zdorov'ya yak osnova effektivnih komunikatsiy v sistemi ohoroni zdorov'ya". *Medichna Informatika ta Inzheneriya*. No. 2. 2015. 85–88. Print. 14. Topol, E. J. *Textbook of cardiovascular medicine*. Lippincott Williams & Wilkins, 2002. Print. 15. Bondarenko, M. F., and Yu. P. Shabanov-Kushnarenko, *Mozgopodobnyie struktury: Spravochnoe posobie. Vol.1* Kiev: Naukova dumka, 2011. Print.

**Bibliography (transliterated):** 1. Popov, A. L. *Sistemyi podderzhki prinyatiya resheniy: Uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: Ural. gos. un-t, 2008. Print. 2. Fick, G., and R. H. Sprague, eds. *Decision Support Systems: Issues and Challenges*. Oxford: Pergamon Press, 1980. Print. 3. Chernomorov, G. A. *Teoriya prinyatiya resheniy: Uchebnoe posobie*.

Надійшло (received) 05.11.2015

**Сітнікова Оксана Олександрівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри обчислювальної техніки та програмування; тел.: (098) 960–89-39; e-mail: oasitnikova@mail.ua.

**Sitnikova Oksana Oleksandrivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of hardware and programming; tel.: (098) 960-89-39; e-mail: oasitnikova@mail.ua.

**Почебут Максим Валентинович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; тел.: (098) 558-63-95; e-mail: pochebut.maksim@mail.ru.

**Pochebut Maxim Valentinovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National University of Radioelectronics, Associate Professor at the Department of software engineering; tel.: (098) 558-63-95; e-mail: pochebut.maksim@mail.ru.

УДК 519.2: 658.5.011

**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 пред-

ложений, 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.

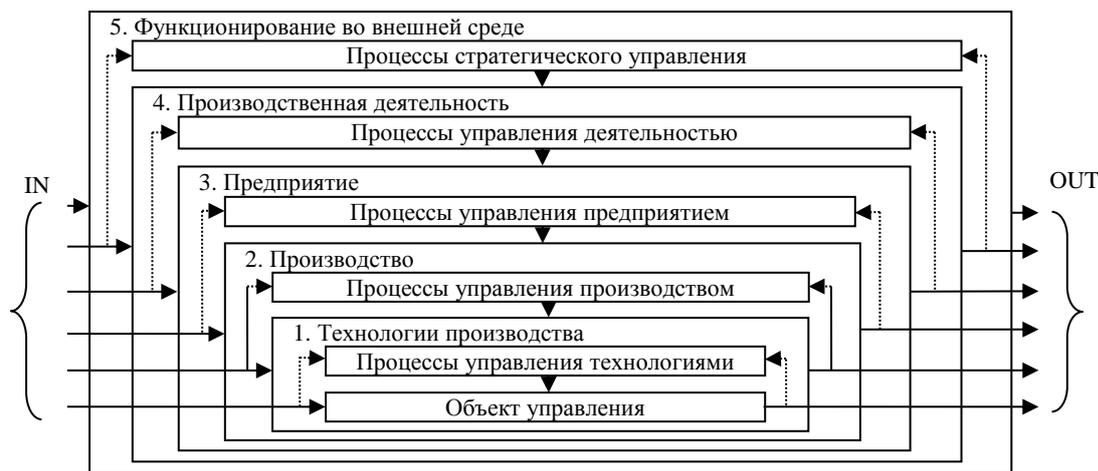


Рис. 1 – Иерархия процессов управления

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 построе-

нием 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 электроэнергетической 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 энергосистемы, приведенные в табл. 1–2.

Таблица 1 – Спрос на электроэнергию в течение суток

Время	Объем, МВт*ча с	Время	Объем, МВт*ча с	Время	Объем, МВт*ча с
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
06:00	1650	14:00	1850	22:00	1000
07:00	1700	15:00	1700	23:00	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 э/бл.	2-й э/бл.	3-й э/бл.	4-й э/бл.
Мин. мощность, МВт	200	250	200	250
Макс. мощность, МВт	500	550	500	450
Текущая мощность, МВт	0	250	300	0
Цена, Грн./МВт*час.	522	450	510	550
Время пуска, час.	1	2	3	4
Время останова, час.	4	3	2	1
Стоимость пуска, грн.	10000	12000	12000	13000
Стоимость останова, грн.	800	500	400	500
Расход топлива, т/МВт	371.3	372.6	373.7	374.2
Начальное состояние	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.

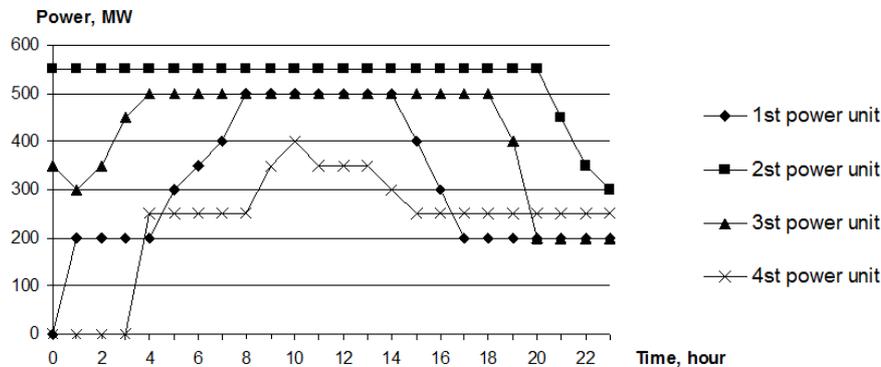


Рис. 2 – Графики нагрузки энергоблоков.  
Суммарная стоимость: 17837900 грн.

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].

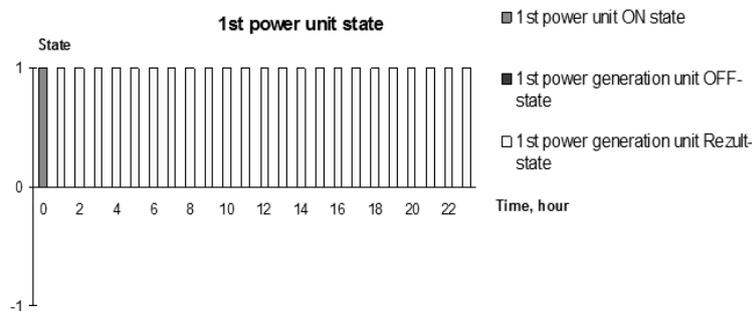


Рис. 3 – График изменения состояния 1-го энергоблока.

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.

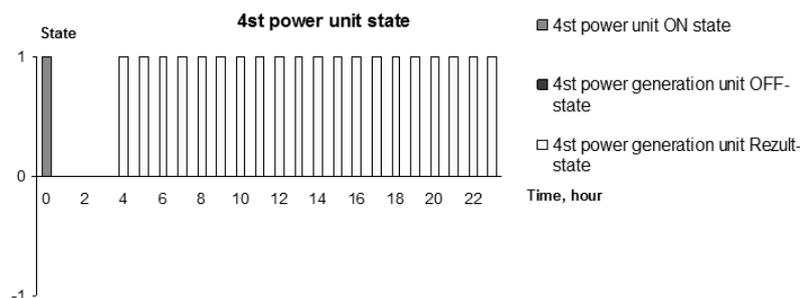


Рис. 4 – График изменения состояния 4-го энергоблока.

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

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

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

4-й энергоблоки, которые были выключены в начале рассматриваемого периода.

Таблица 3 – Изменения данных времени пуска и останова ТЭС

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

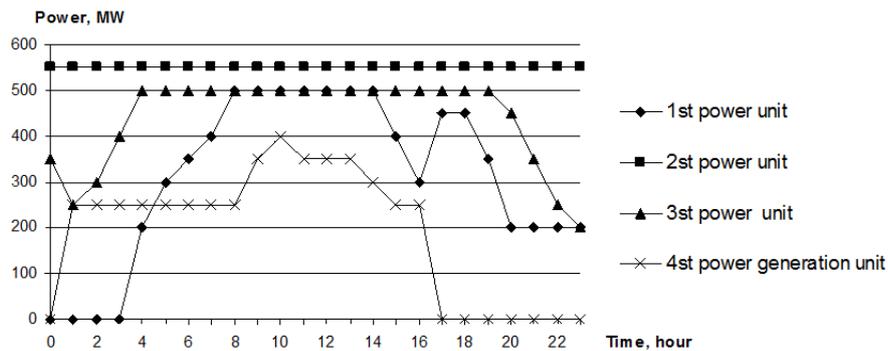


Рис. 5 – Графики нагрузки энергоблоков согласно новому решению.  
Суммарная стоимость: 17 766 000 грн.

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

ями состояний 4-го энергоблока по первому варианту решения, показанному на рис. 4. Отличия заключаются в объемах генерации энергоблоков (см. рис. 5).

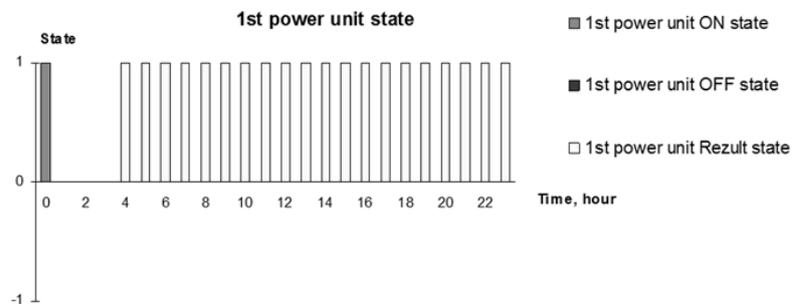


Рис. 6 – График изменения состояния 1-го энергоблока по новому решению.

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 решению 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.

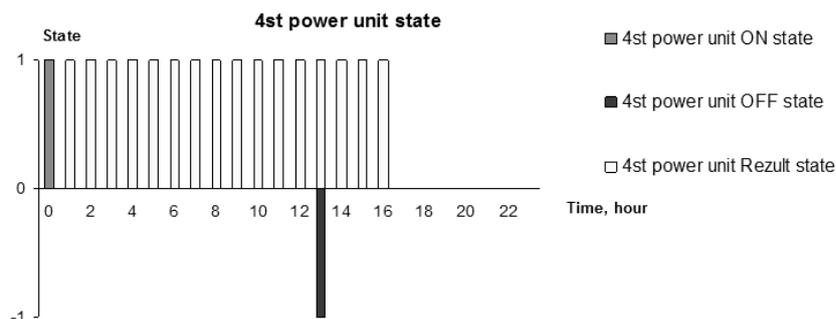


Рис. 7 – График изменения состояния 4-го энергоблока по новому решению.

Почасовые объемы генерации соответствуют значениям, определенным в соответствии с новым решением задачи, и приведены на графике нагрузки 4-го энергоблока, рис. 5. Следует отметить существование 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. Вороний Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: 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 «ХПІ». – 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. "Intel'lectual'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

**Шевченко Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: sv-shevchenko@ukr.net.

**Shevchenko Sergii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Information Technology Management; tel.: (057) 707-64-74; e-mail: sv-shevchenko@ukr.net.

**Егоянец Арсений Артемович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: artemegoyanc@mail.ru.

**Egoyanc Arseniy Artemovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (057) 707-64-74; e-mail: artemegoyanc@mail.ru.