

## ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕВЫХ ГРАФИКОВ ЗАМЕНЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА НЕЛИНЕЙНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

**Н.И. Евжик\*, А.Н. Сесекин\*, О.Л. Ташлыков\*, С.Е. Щеклеин\*,  
А.А. Кадников\*\***

*\*ГОУВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»*

*\*\*ОАО «Атомэнергоремонт»*



Показаны пути сокращения сроков замены парогенераторов (ПГ) АЭС с ВВЭР-1000. Обоснована необходимость оптимизации сетевых графиков замены парогенераторов для минимизации сроков простоя энергоблока АЭС. Описана разработка алгоритма и расчетной программы определения критического пути и оптимизации сетевого графика производства работ по замене четырех парогенераторов. Приведен пример оптимизации сроков замены четырех парогенераторов.

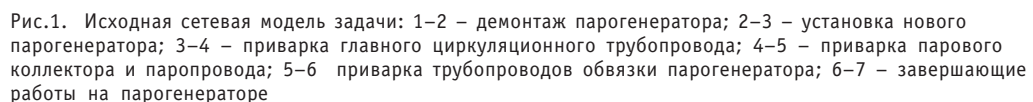
Парогенератор является важнейшим элементом АЭС, который обеспечивает выработку пара для турбогенератора и охлаждение активной зоны реактора. Предельное состояние ПГ наступает в случае невозможности выполнять им свои функции (отвода тепла от теплоносителя первого контура и генерации сухого насыщенного пара), а также при нарушении пределов безопасной эксплуатации (нарушении целостности защитного барьера и невозможности ее восстановления) [1].

Несмотря на значительные достижения в понимании причин и механизмов, приводящих к преждевременному выходу из строя ПГ, и интенсивное международное сотрудничество, направленное на увеличение их ресурса, пока не удалось найти реальных путей доведения этого ресурса до фактически возможных сроков службы АЭС, действующих в настоящее время в России и за рубежом. Для продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 сверх проектного, а в ряде случаев для обеспечения проектного срока службы необходима замена парогенераторов, которая требует трудоемких и дорогостоящих работ со значительными дозовыми нагрузками на персонал [2].

Как показывает анализ предыдущих замен, технические мероприятия, внедренные в процессе замены парогенераторов на Балаковской АЭС в 1999–2000 гг., а также доработка проекта производства работ с учетом новых разработок для Нововоронежской АЭС (2009 г.) позволяют сократить продолжительность замены ПГ на 20–30 суток [3].

© Н.И. Евжик, А.Н. Сесекин, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.А. Кадников, 2008

В связи с этим был разработан алгоритм оптимизации сетевого графика замены четырех ПГ. Для разработки алгоритма расчета многочисленных работы процесса замены ПГ были укрупнены по специализации работников (демонтажные и монтажные, сварочные, контрольные работы и т.д.) до семи этапов (рис.1) [4].



2) формируется критический путь, т.е. непрерывная последовательность критических операций, таких, что начальная операция выходит из начального события, а последняя операция завершается финальным событием.

При заданном количестве работников минимизации сроков выполнения всех работ по замене парогенераторов можно добиться только перераспределением специалистов между работами на отдельных парогенераторах. При этом увеличивается время на замену первого (второго) парогенератора и уменьшается на замену последующих, как будет показано далее. Работы по замене отдельных парогенераторов должны закончиться одновременно (или с минимальной разницей во времени) (рис. 2).

Составим математическую модель задачи. Обозначим через  $M$  трудоемкость всех работ с 3 по 7 событие на одном парогенераторе. Эта величина вычисляется по формуле

и в рассматриваемом случае равна  $6840 \text{ чел.сут}$  ( $t_{i,j+1}$  – продолжительность работ с  $i$ -го по  $i+1$  событие). Пусть  $x_{ij}$  – количество человек, работающих на  $j$ -м этапе работ по замене  $i$ -го парогенератора в течение суток (т.е. за 3 смены).

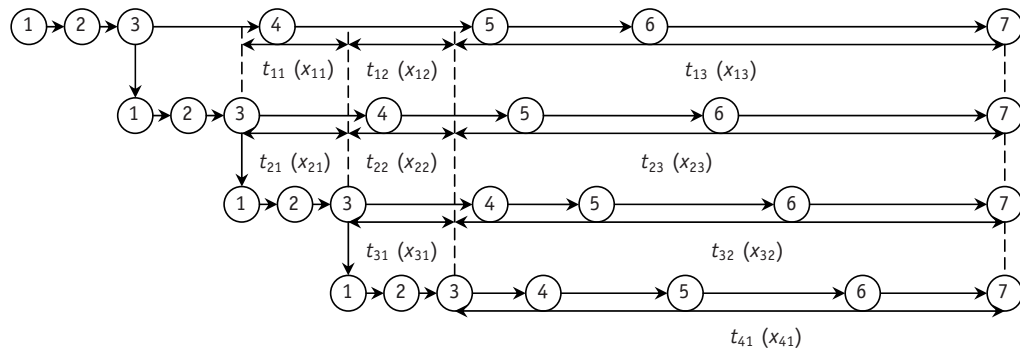


Рис. 2. Оптимизированный сетевой график замены четырех парогенераторов:  $t_{ij}$  – продолжительность выполнения  $j$ -го этапа работ на  $i$ -м парогенераторе;  $x_{ij}$  – общее количество человек, работающих на  $j$ -м этапе работ по замене  $i$ -го парогенератора (в течение суток)

Из общей трудоемкости по замене парогенератора вычтем объемы работ, которые сделает за 10 суток бригада численностью 45 человек, за время  $t_{11}$  (10 суток) – численностью  $x_{11}$ , за время  $t_{12}$  (10 сут) – численностью  $x_{12}$  (см. рис.2). Разделив полученное значение на  $x_{13}$ , получим время, за которое будут проведены все последующие работы на первом парогенераторе. Это время не должно превосходить время, за которое будут проведены работы с 3 по 7 событие на четвертом парогенераторе. В результате получим неравенство

$$\frac{M - 45 \cdot 10 - 10 \cdot x_{11} - 10 \cdot x_{12}}{x_{13}} \leq \frac{M}{x_{41}}. \quad (1)$$

Рассуждая аналогично, для второго парогенератора получим неравенство

$$\frac{M - 10 \cdot x_{21} - 10 \cdot x_{22}}{x_{23}} \leq \frac{M}{x_{41}}, \quad (2)$$

а для третьего –

$$\frac{M - 10 \cdot x_{31}}{x_{32}} \leq \frac{M}{x_{41}}. \quad (3)$$

Из условия, что максимальная численность бригады составляет 45 человек, можно записать три уравнения:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{21} &= 90, \\ x_{12} + x_{22} + x_{31} &= 135, \\ x_{13} + x_{23} + x_{32} + x_{41} &= 180. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем функционал

$$f = \frac{M}{x_{41}}, \quad (5)$$

который задает время выполнения работ на последнем парогенераторе и в силу неравенств (1)–(3) определяет время завершения всех работ.

В результате мы получили задачу нелинейного программирования [5]: требуется минимизировать функционал (5) при выполнении условий (1)–(4) и условия неотрицательности на все переменные.

Численное решение этой задачи нелинейного программирования показало, что минимальное значение функционала (5) будет иметь место тогда, когда в выражениях (1)–(3) будет реализовываться точное равенство. Такое решение представляется естественным, т.к. при этом работы на всех парогенераторах закончатся одновременно и людские ресурсы будут использованы максимально эффективно.

Учитывая свойство оптимального решения, можно получить явный вид для искомого решения. Для оптимального решения искомые переменные должны удовлетворять системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{M - 45 \cdot 10 - 10 \cdot x_{11} - 10 \cdot x_{12}}{x_{13}} = \frac{M}{x_{41}} \\ \frac{M - 10 \cdot x_{21} - 10 \cdot x_{22}}{x_{23}} = \frac{M}{x_{41}} \\ \frac{M - 10 \cdot x_{31}}{x_{32}} = \frac{M}{x_{41}} \\ x_{11} + x_{21} = 90 \\ x_{12} + x_{22} + x_{31} = 135 \\ x_{13} + x_{23} + x_{32} + x_{41} = 180. \end{cases} \quad (6)$$

Преобразуем систему (6) к виду

$$\begin{cases} (M - 450 - 10 \cdot x_{11} - 10 \cdot x_{12}) \cdot x_{41} = M \cdot x_{13} \\ (M - 10 \cdot x_{21} - 10 \cdot x_{22}) \cdot x_{41} = M \cdot x_{23} \\ (M - 10 \cdot x_{31}) \cdot x_{41} = M \cdot x_{32} \\ x_{11} + x_{21} = 90 \\ x_{12} + x_{22} + x_{31} = 135 \\ x_{13} + x_{23} + x_{32} + x_{41} = 180. \end{cases} \quad (7)$$

Из этой системы величина  $x_{41}$  определяется однозначно при заданных исходных параметрах:

$$x_{41} = \frac{180 \cdot M}{4 \cdot M - 2700} = 49,93 \text{ чел.}$$

Нецелое значение количества человек говорит о необходимости перехода работника в течение смены на другой участок работы. Условие получения целых значений будет введено ниже.

Минимальное время, за которое могут быть выполнены работы с 3 по 7 событие при замене четвертого парогенератора, составляет

$$t = \frac{M}{x_{41}} = 137 \text{ сут.}$$

Следовательно, при заданных исходных параметрах продолжительность выполнения работ по оптимизированному сетевому графику равна

$$t_{\text{кр}}^{\text{опт}} = t_{1a2a} + t_{2a3a} + t_{1b2b} + t_{2b3b} + t_{1b2b} + t_{2b3b} + t_{1\Gamma2\Gamma} + t_{2\Gamma3\Gamma} + \frac{M}{x_{41}} = 177 \text{ сут,}$$

где  $t$  – длительность выполнения работы; 1, 2, 3 – номер события сетевого графика; а, б, в, г – номера парогенераторов (см.рис.1).

При этом относительное сокращение продолжительности замены четырех парогенераторов при оптимизации сетевого графика составляет

$$\delta = \frac{t_{\text{кр}} - t_{\text{кр}}^{\text{опт}}}{t_{\text{кр}}} = 7,8\%.$$

Дальнейшей целью решения поставленной задачи является определение распределения работников по этапам работ, которое и обеспечивает сокращение продолжительности замены парогенераторов за счет выравнивания сроков завершения работ на отдельных парогенераторах.

Преобразуем систему уравнений (7), приняв замену  $t = \frac{M}{x_{41}}$ :

$$\begin{cases} M - 450 - 10 \cdot x_{11} - 10 \cdot x_{12} = t \cdot x_{13} \\ M - 10 \cdot x_{21} - 10 \cdot x_{22} = t \cdot x_{23} \\ M - 10 \cdot x_{31} = t \cdot x_{32} \\ x_{11} + x_{21} = 90 \\ x_{12} + x_{22} + x_{31} = 135 \\ x_{13} + x_{23} + x_{32} = 180 - x_{41}. \end{cases}$$

В этой системе 6 уравнений с 9 неизвестными. Произвольно выбрав 3 переменных  $x_{11}$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{23}$ , выразим через них остальные:

$$\begin{cases} x_{13} = \frac{M - 450 - 10 \cdot x_{11} - 10 \cdot x_{12}}{t} \\ x_{22} = \frac{M - 10 \cdot (90 - x_{11}) - t \cdot x_{23}}{10} \\ x_{21} = 90 - x_{11} \\ x_{31} = 135 - x_{12} - \frac{M - 10 \cdot (90 - x_{11}) - t \cdot x_{23}}{10} \\ x_{32} = \frac{M - 10 \cdot (135 - x_{12} - \frac{M - 10 \cdot (90 - x_{11}) - t \cdot x_{23}}{10}) - t \cdot x_{23}}{t} \\ x_{41} = \frac{180 \cdot M}{4 \cdot M - 2700}. \end{cases}$$

Из системы видно, что величина  $x_{41}$  определяется однозначно, и позволяет рассчитать минимальное время замены последнего парогенератора. Для определения свободных переменных  $x_{11}$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{23}$ , которые могут принимать любые неотрицательные значения, воспользуемся методом перебора, введя дополнительные ограничения:

- количество человек не может быть отрицательным;
- количество человек  $x_{41}$ , занятых на работах по замене четвертого парогенератора, максимально;
- соотношения количеств работников должны быть

$$\begin{aligned} x_{41} &> x_{32} > x_{23} > x_{13}, \\ x_{31} &> x_{22} > x_{12}, \\ x_{21} &> x_{11}; \end{aligned}$$

- продолжительность выполнения работ бригадами численностью  $x_{13}$  (ПГ №1),  $x_{23}$  (ПГ №2),  $x_{32}$  (ПГ №3) и  $x_{41}$  (ПГ №4) составляет 137 дней (см. рис.2);
- продолжительность выполнения работ с первого по третье событие на всех парогенераторах составляет 10 дней.

Расчеты, выполненные с учетом этих ограничений, выявили 9 вариантов оптимального распределения работников по этапам работ, в том числе дробные, что означает необходимость перехода работников с объекта на объект в течение смены, что в реальных условиях реализовать практически невозможно.

Поэтому было введено дополнительное условие, исключающее переход работников с объекта на объект в течение смены. В результате был получен один вариант оптимального распределения работников по этапам работ (табл. 1). При этом работы на отдельных парогенераторах будут заканчиваться с некоторым сдвигом.

Таблица 1

$M$	$t_{13}$	$t_{23}$	$t_{32}$	$t_{41}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{41}$
6840,00	135,37	136,98	135,72	137,00	41	43	41	49	46	42	46	47	50

На рис. 3 представлена диаграмма сроков замены отдельных парогенераторов по оптимизированному сетевому графику.

Для решения подобных задач было специально разработано программное обеспечение в среде программирования DELPHI, которое имеет доступный интерфейс и позволяет определять оптимальное распределение работников по этапам параллельно выполняемых работ с целью минимизации сроков.

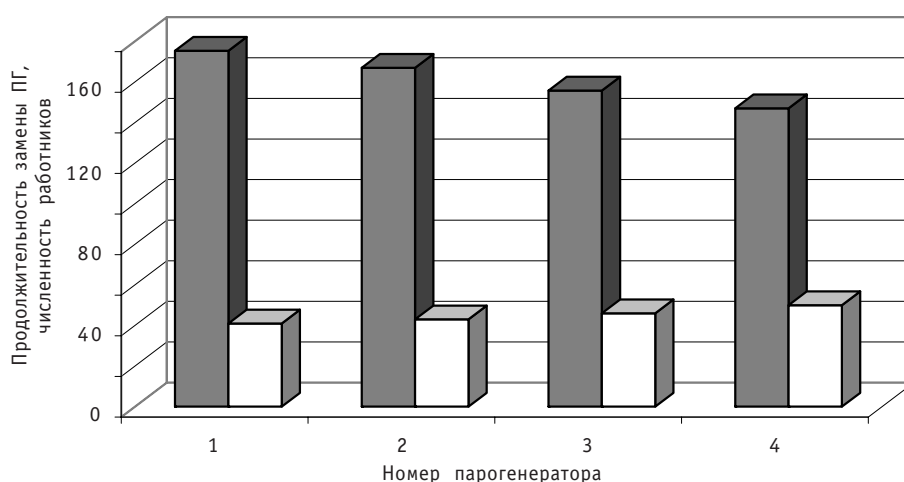


Рис. 3. Продолжительность замены парогенераторов и численность работников по оптимизированному графику: ■ – продолжительность замены; □ – численность

## ВЫВОДЫ

1. При устранении объективных и субъективных причин, вызывающих задержки в производстве работ по замене парогенераторов АЭС с реактором ВВЭР-1000, дальнейшее сокращение сроков замены может быть достигнуто путем оптимизации сетевого графика.

2. Оптимизация продолжительности работ, выполняемых одновременно на нескольких объектах и связанных с ограничением по использованию монтажного и ремонтного оборудования, путей транспортировки и т.д., возможна с помощью перераспределения рабочей силы.

3. Полученное с помощью разработанных расчетных программ оптимальное распределение работников по этапам работ позволяет сократить общую продолжительность замены 4-х парогенераторов на 15 суток или на 7,8% относительно запланированной.

4. Разработанные расчетные программы могут быть использованы в различных отраслях экономики для планирования работ, одновременно выполняемых на нескольких объектах при ограничениях в использовании монтажной, ремонтной и другой техники.

### **Литература**

1. *Ташлыков О.Л., Кадников А.А.* О проблеме продления ресурса и замене парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-1000/Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров//Сборник научных трудов. – Екатеринбург: 000 ИД «Урал Юр Издат», 2006. – С.36-46.
2. *Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Кадников А.А.* Анализ повреждаемости парогенераторов, обогреваемых водой под давлением, с точки зрения контролируемого продления ресурса до замены парогенераторов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №4. – С.93-102.
3. *Кадников А.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е.* Оптимизация работ по замене парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000/Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики//Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции (19-21 апреля 2006 г.). – М., 2006. – С.141-143
4. *Евжик Н.И., Корнилов Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Кадников А.А.* Математические методы оптимизации продолжительности замены парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000//Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых (17-21 декабря 2007 г. Екатеринбург). – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 85-87.
5. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

Поступила в редакцию 25.09.2008

shift rigidity (Timoshenko S.P.'s beam) is developed. On the basis of the calculations spent within the limits of this model with use of experimentally received non-stationary hydrodynamic loadings possibility of excitation of intensive vibrations in area of a fuel rods beam close to the bottom basic lattice is shown. Experimental data on vibrations displacements of a fuel rods beam will well be coordinated with settlement values that confirms justice offered.

#### **УДК 621.039.548**

*Effective Heat Conductivity of Rod and Tube Bundles with Random Deviation from Regular Lattice* \ V. Fedotovskiy, A. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 12 illustrations. – References, 8 titles.

Effective heat conductivity of rod and tube bundles is one of thermophysical properties necessary for calculation of thermo hydraulic characteristics of heat producing devices, heat exchange devices and steam generators. This report introduces results of mathematical modeling of effective heat conductivity of transversally anisotropic rod bundles in solid conductive medium formed by cylindrical rods in rectangular and triangular grids compressed or stretched in heat flow direction. Similar numerical modeling was performed for anisotropic bundles of elliptic cylinders and also for disperse-armed materials with spherical and ellipsoidal inclusions. On the basis of quite precise numerical solutions of stationary heat conductivity problems in representative cells by finite elements method dependencies for components of effective heat conductivity tensor in principal axes were received and comparison with formulas received analytically for heterogeneous mediums of various structure was performed. Effective heat conductivity of rod bundles with random deviation from regular grid was also considered. Deviation values were set as deviation matrix that was randomly generated by the normal distribution software randomizer. As a result of comparison limits of application of various analytic formulas and methods of their specification were determined.

#### **УДК 621.039.56**

*Optimization of a Network Diagrams for Replacement of Steam- and Gas Generators of NPP with VVER-1000 using the Method of Nonlinear Mathematical Programming* \ N.I. Yevzhik, A.N. Sesekin, O.L. Tashlykov, S.Ye. Sheklein, A.A. Kadnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

Ways of time reduction of replacement of steam and gas generators nuclear energy station with VVER-1000 are shown. Necessity of time minimization of the power unit is proved. Development of algorithm and the program settlement a critical way and optimization of the network diagram on replacement of four steam and gas generators is described. The example of time replacement optimization generators is given.

#### **УДК 621.039.548**

*A Method to estimate efficiency of a nuclear power unit capacity maneuver algorithm for the case of WWER reactors* \ M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 12 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 7 titles.

A nuclear power unit capacity maneuver algorithm efficiency estimation technique for a WWER reactor working in the mode of variable loadings is offered. It is shown, that fuel rod cladding material operation time under multiple cyclic nuclear reactor power changes can be estimated by calculation of the accumulated energy of irreversible cladding material creep deformations.

#### **УДК 621.039**

*About an Optimal SPTE Number Search Model* \ A.P. Unshchikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 6 titles.

This paper considers the mathematical optimization model of an SPTE number search at a storage facility of some NPP subsystem. This model can help to calculate a number of SPTE to be bought with