



## ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ

---

---

УДК 004.94  
ББК 32.965

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НА БАЗЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГРАФОВ

**Кадырова Азиза Амануллаевна**

Кандидат технических наук, заместитель директора  
Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации  
aziza.kaa@innovation.uz  
ул. Университетская, 2, 100095 г. Ташкент, Узбекистан

**Кадыров Амир Амануллаевич**

Кандидат технических наук, заведующий сектором  
Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации  
amir.kadirov@gmail.com  
ул. Университетская, 2, 100095 г. Ташкент, Узбекистан

**Аннотация.** В статье изложен графодинамический метод моделирования сложных технологических объектов предприятий. Построена математическая модель и разработан алгоритм нахождения расписаний ремонтов оборудования, разработан комплекс динамических графовых моделей системы управления техническим осмотром и ремонтами оборудования.

**Ключевые слова:** структурные методы моделирования, технологическое оборудование, динамический граф, дискретность, декомпозиция.

Стабильная работа любого промышленного предприятия, его экономическая эффективность во многом зависят от надежной работы основного (технологического) оборудования. Это становится предельно понятным, если учесть, что «носителями» технологичес-

ких процессов, управляемых даже самыми высококачественными системами автоматического управления, являются единицы и комплексы технологического оборудования. И если по какой-либо причине произойдет непредвиденная остановка оборудования, то никакие

наилучшие технологии или управляющие ими автоматические системы не могут восполнить экономические потери, вызванные этими простоями.

Современные виды сложного оборудования зачастую состоят из нескольких десятков и более тысяч взаимосвязанных друг с другом узлов и элементов, изготовленных из самых различных по своим свойствам металлов и материалов. При этом состояние каждого элемента и узла меняется во времени в соответствии с их характеристиками, остаточными ресурсами и наработками. Учет этих особенностей и целого спектра других проблем, связанных с обеспечением стабильной работы технологического оборудования предприятий, возможен в рамках создаваемых автоматизированных систем управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования (АСУ ТОиР). При этом существенная роль при разработке современных АСУ ТОиР должна быть отведена проблеме создания методов и моделей формализованного представления единиц и комплексов технологического оборудования.

В зависимости от целей моделирования для одного и того же технологического оборудования могут быть построены различные математические модели. Например, для оценки надежности это будут одни модели, для оценки прочности деталей и узлов – другие и т. д. В данном случае речь идет о математических моделях, позволяющих воспроизвести динамические (с изменяющимися во времени характеристиками) структуры технологического оборудования в памяти ЭВМ для целей оценки и прогнозирования состояния узлов и деталей, а следовательно, и оборудования в целом с целью упреждения предаварийных ситуаций, минимизации простоев оборудования и увеличения эффективности предприятия.

С учетом дискретности структуры, естественной декомпозиции технологического оборудования на множество взаимосвязанных узлов и деталей с изменяющимися во времени характеристиками – остаточными ресурсами и наработками в данной статье в качестве математических моделей рассматриваемой предметной области предлагается использование динамических графов.

Динамическими названы графы (графоиды) с изменяющимися во времени элемен-

тами – множествами вершин, дуг (ребер) либо их весами:

$$G_t = \langle X_t, (V_t, \Omega_t) \rangle, \quad (1)$$

где  $X_t$ ,  $V_t$ ,  $\Omega_t$  – множество вершин, дуг и весов дуг, определяемых с помощью отображений  $X_t: t \rightarrow X$ ,  $V_t: t \rightarrow V$ ,  $\Omega_t: t \rightarrow \Omega$ , причем  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$  – линейно упорядоченное конечное множество моментов времени. В зависимости от специфики моделируемой системы или решаемой задачи в выражении (1) могут изменяться во времени не все, а лишь отдельные элементы.

Динамические графы органически сочетают в себе особенности дискретных динамических систем, теоретико-множественных и имитационных подходов, используемых при исследовании сложных многоуровневых систем, то есть представляют собой определенный класс моделей [1; 2].

### Моделирование оборудования с помощью динамических графов

При разработке формализованных структурных методов, основанных на использовании динамических графов, важную роль играет вопрос установления закономерностей изменения во времени ресурсов работы элементов и узлов оборудования.

Покажем вначале возможность решения задачи на качественном уровне. Для этого выделим три области изменения остаточного ресурса во времени:

$g_1 > 0$  – ресурс детали (узла) не исчерпан, режим работы соответствует режиму нормальной эксплуатации оборудования;

$g_2 = 0$  – ресурс детали (узла) исчерпан, режим работы соответствует предаварийному режиму эксплуатации оборудования;

$g_3 < 0$  – ресурс детали (узла) исчерпан, режим работы соответствует режиму аварийной эксплуатации оборудования.

На рисунке 1 представлена качественная картина изменения остаточных ресурсов во времени для деталей примера (также см. таблицу).

### Изменение остаточных ресурсов во времени для деталей

Детали	1	2	3	4	5	6
Номинальные ресурсы (час)	5 000	3 000	2 000	1 500	1 000	500

На рисунке 2 представлена временная диаграмма замены деталей для этого же примера в виде последовательностей импульсов, периоды которых равны номинальным ресурсам работы деталей из таблицы. Временные диаграммы рассматриваемого примера даны для случая точного соблюдения дат замены элементов (узлов) оборудования, отнесенных к номинальным ресурсам. Поэтому каждая из временных последовательностей имеет син-

хронный период повторения  $T_i$ . В реальности из-за запаздываний по времени замены либо преждевременного выхода узлов (элементов) из строя периоды повторений  $T_i$  будут иметь сложный переменный характер.

Структурно-сложные технологические сети и оборудование в результате естественной декомпозиции могут быть представлены конечными множествами узлов и деталей, которые можно интерпретировать как множе-

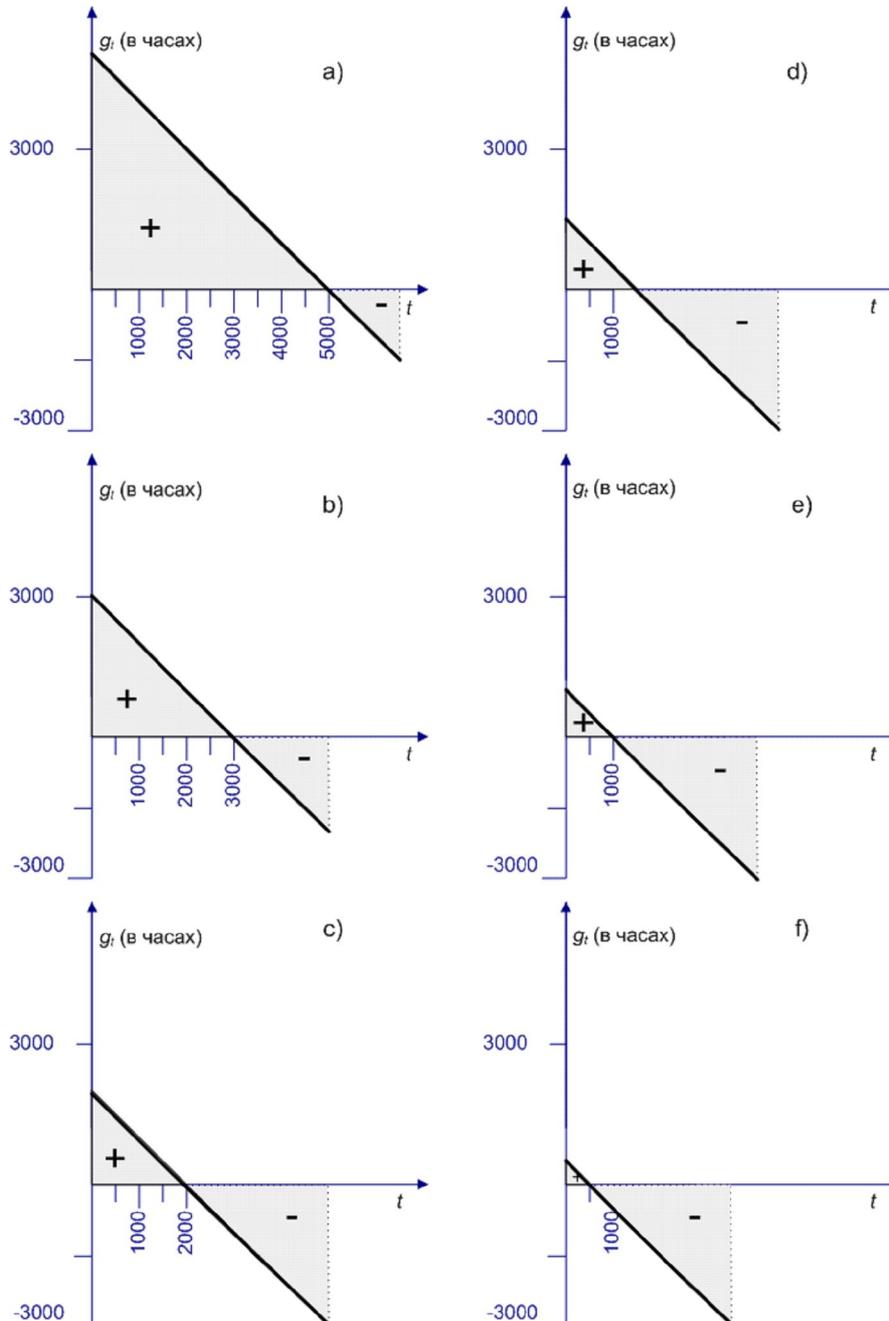


Рис. 1. Качественная картина изменения во времени остаточных ресурсов работы деталей оборудования

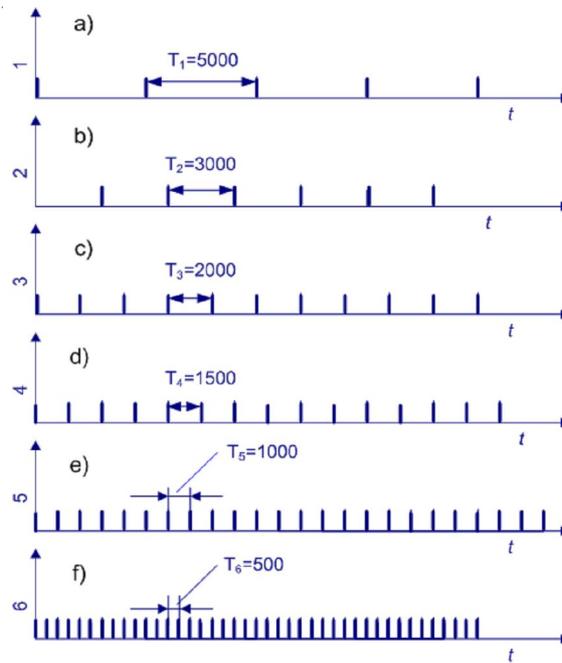


Рис. 2. Временные диаграммы замены деталей для примера к таблице

ство вершин графа, а связи между узлами и входящими в их состав деталями – как множество дуг графа.

Если теперь отождествить вес каждой вершины графа с изменяющимся во времени остаточными ресурсами  $g_t$  узла (детали), то естественным образом придем к формализованной структурной модели оборудования в виде динамического графа (1).

При этом изменения веса каждой вершины графа соответствуют изменениям во времени остаточного ресурса конкретного узла или детали.

В качестве иллюстрации на рисунке 3а, б представлены фрагменты динамического графа

оборудования соответственно для случая, когда  $g_t > 0$  для всех узлов и вершин графа, и для случая, когда  $g_t < 0$  для одного узла ( $e^1 < 0$ ) и одной детали ( $f^4 < 0$ ), пунктиром на рисунке 3б выделены вершины графа, соответствующие этим аварийным узлу и детали, и смежные дуги (взаимосвязи в оборудовании).

Ясно, что по отношению к оборудованию, описываемому графом (рис. 3б), необходимо принимать меры по замене (ремонту) узла и детали.

Для компактности записей в дальнейшем изложении индекс  $t$  в обозначениях вершин динамических графов будем опускать, приняв соглашение о том, что веса вершин графов изменяются во времени.

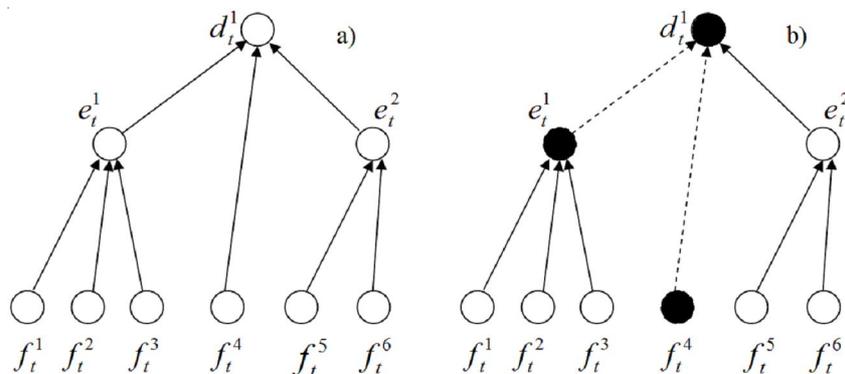


Рис. 3. Фрагменты динамического графа оборудования

**Алгоритмизация учета  
наработок узлов и деталей**

Как видно из вышеизложенного, случаю, когда выходит из строя та или иная деталь либо узел, соответствует динамический граф, в котором отсутствуют все дуги, смежные той вершине, которая соответствует вышедшей из строя детали (узлу). Возможен другой случай, а именно: все детали и узлы работают в нормальном режиме, но по истечении времени меняются их остаточные ресурсы, и в этом случае мы будем иметь математическую модель в виде графа, у которого переменными во времени являются веса вершин. Остаточные ресурсы находятся в однозначном соответствии с наработками соответствующих деталей и узлов и в целом оборудования. В этом плане для того, чтобы воспроизводить в памяти ЭВМ динамические графовые модели структур, учитывающих динамику изменения остаточных ресурсов, нам необходимо построить алгоритм расчета наработок узлов и деталей. При разработке алгоритма за основу принят трехсменный режим работы предприятия. Исходя из этого ниже рассматриваются различные возможные случаи остановки и запуска оборудования, при этом априори понятно, что при остановке оборудования «останавливаются» все узлы и детали, входящие в состав данного оборудования. Для наглядности при построении алгоритма будем применять следующие обозначения:

– интервалы времени, в течение которых работает оборудование, будем обозначать в виде импульсов на временной оси;

– интервалы времени, в течение которых оборудование простаивает, будем отмечать паузами между импульсами.

С учетом этих замечаний рассмотрим различные случаи возможных пусков и остановок оборудования и построим соответствующий алгоритм для общей ситуации.

Введем обозначения:

- $t_o$  – время остановки оборудования;
- $t_n$  – время пуска оборудования;
- $t_{o,i}$  – время  $i$ -й остановки оборудования;
- $t_{n,j}$  – время  $j$ -го пуска оборудования;
- $t_{np}$  – время простоя за данные сутки;
- $t_{np-1}$  – суммарный простой на предыдущие сутки;
- $t_{np\Sigma}$  – суммарный простой за весь период начиная с последней замены узла или детали:

$$t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np};$$

$H$  – наработка за данные сутки;

$H_{-1}$  – наработка суммарная на предыдущие сутки;

$H_\Sigma$  – суммарная наработка за весь период начиная с последней замены (ремонта) узла или детали:

$$H_\Sigma = H_{-1} + H;$$

$P$  – номинальный ресурс;

$Q$  – остаточный ресурс;

$Q_u$  – остаточный ресурс в часах;

$Q_c$  – остаточный ресурс в сутках;

$Q_m$  – остаточный ресурс в месяцах;

$t_3$  – прогнозируемое время замены узла или детали (остановки на ремонт);

$t_{3ч}$  – прогнозируемое время замены узла или детали в часах;

$t_{3с}$  – прогнозируемое время замены узла или детали в сутках;

$t_{3м}$  – прогнозируемое время замены узла или детали в месяцах;

$$t_3 = Q \times K.$$

В данном случае физический смысл коэффициента  $K$  заключается в том, что во время всевозможных простоев (от одного капитального ремонта до следующего) все узлы и детали также «простаивают», не работают. Это время простоя в среднем на  $K$  «удлиняет» прогнозируемую дату замены узла или детали. При разработке алгоритмов будем рассматривать интервалы времени, продолжительность которых кратна 24 часам (см. рис. 4).

Режим бесперебойной работы оборудования в течение нескольких суток (см. рис. 4д) охватывает все возможные ситуации остановок и запусков оборудования. Поэтому алгоритм расчета наработок раскроем для этого случая.

1) Первые сутки:

наработка за сутки:  $H = t_o + (24 - t_n)$ ;

суммарная наработка:  $H_\Sigma = H_{-1} + H$ ;

простой за сутки:  $t_{np} = t_n - t_o$ ;

суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np} = t_{np}$ .

2) Вторые сутки:

24 ( $\approx 00$ ) часов – отмечаем: «наработка» продолжается;

наработка за сутки:  $H = T = 24$  часа,

суммарная наработка:  $H_\Sigma = H_{-1} + H$ ;

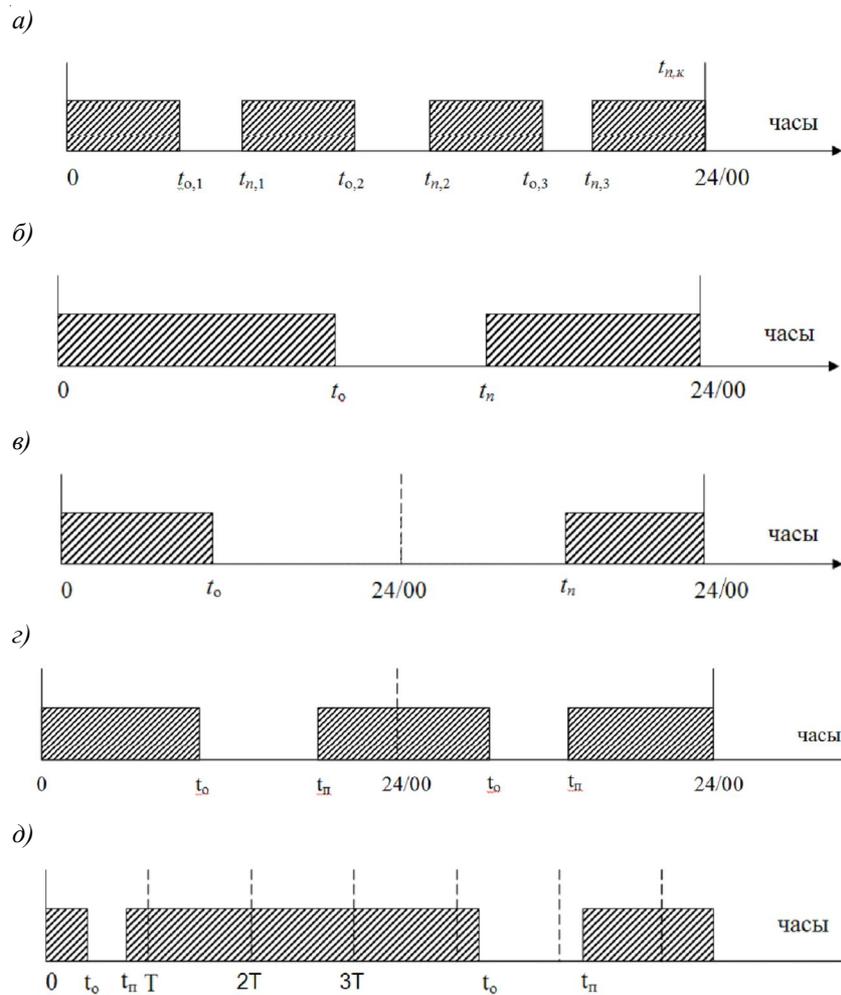


Рис. 4. Режимы остановок и запусков технологического оборудования:

- а) режим многократных остановок и запусков в течение одних суток; б) одна остановка и один запуск оборудования; в) режим пуска оборудования на следующие сутки; г) режим второй остановки на вторые сутки; д) режим бесперебойной работы в течение нескольких суток

- простой за сутки:  $t_{np} = 0$ ;  
 суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np} = t_{np-1}$ .
- 3) Третьи сутки:  
 24 ( $\approx 00$ ) часов – отмечаем: «наработка» продолжается;  
 наработка за сутки:  $H = T = 24$  часа,  
 суммарная наработка:  $H_{\Sigma} = H_{-1} + H$ ;  
 простой за сутки:  $t_{np} = 0$ ;  
 суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np} = t_{np-1}$ .
- 4) Четвертые сутки:  
 24 ( $\approx 00$ ) часов – отмечаем: «наработка» продолжается.  
 Если нет остановок, то наработка за сутки равна:  $H = T = 24$  часа;  
 суммарная наработка:  $H_{\Sigma} = H_{-1} + H$ ;

- простой за сутки:  $t_{np} = 0$ ;  
 суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np} = t_{np-1}$ .
- 5) Пятые сутки:  
 24 ( $\approx 00$ ) часов – отмечаем: «наработка» продолжается.  
 В  $t_o$  произошла остановка, и оборудование стоит до конца суток и далее.  
 Нарработка за сутки:  $H = t_o$ ;  
 суммарная наработка:  $H_{\Sigma} = H_{-1} + H = H_{-1} + t_o$ ;  
 простой за сутки:  $t_{np} = T - t_o = 24 - t_o$ ;  
 суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np}$ .
- 6) Шестые сутки:  
 24 ( $\approx 00$ ) часов – отмечаем: произошла остановка, то есть  $t_o = 0$ ;  
 наработка за сутки:  $H = (T - t_n) = (24 - t_n)$ ;

суммарная наработка:  $H_{\Sigma} = H_{-1} + H$ ;  
 простой за сутки:  $t_{np} = t_n - t_0 = t_n$ ;  
 суммарный простой:  $t_{np\Sigma} = t_{np-1} + t_{np}$ .

**Алгоритм прогнозирования даты замены оборудования**

Введем обозначения:

$x$  – дата запуска;  
 $y$  – месяц, содержащий дату запроса, то есть  $x \in y$ ;

$t_3$  – прогнозируемый срок замены;

$y_q$  – число дней в месяце  $y$ .

Алгоритм:

1) определяем количество дней  $\alpha$  до конца месяца  $y$ :

$$\alpha = y_q - x.$$

2) прибавляем к  $\alpha$  числа дней по следующим месяцам:

$$\alpha + y_q^1 + y_q^2 + y_q^3 + \dots + y_q^k. \quad (3)$$

3) после каждого шага результат сложения сравнивается с  $t_3$ , то есть:

$$(\alpha + y_q^1) < t_3;$$

$$(\alpha + y_q^1 + y_q^2) < t_3;$$

$$(\alpha + y_q^1 + y_q^2 + y_q^3) < t_3.$$

4) если суммы, сравниваемые с  $t_3$ , меньше чем  $t_3$ , продолжаем процедуру сложения всех дней последующих месяцев.

5) Предположим, на некотором шаге:

$$(\alpha + y_q^1 + y_q^2 + y_q^3 + \dots + y_q^k) > t_3. \quad (4)$$

Тогда из числа дней последнего месяца  $y_q^k$  вычитаем  $t_3$ :

$$\beta = y_q^k - t_3.$$

6) Дата замены  $d_3$  определяется из разности:

$$d_3 = y_q^k - \beta.$$

Сформированная в памяти ЭВМ-модель отображается на мониторе в виде динамического графа. Темные сектора вершин графа соответствуют процентам наработок узлов (деталей), а светлые сектора – процентам остаточных ресурсов. В качестве иллюстрации на рисунке 5 а, б приведены граф-модели наработок и остаточных ресурсов силовой турбины и одного из узлов турбины – ротора. Соответствующая информация, параллельно формализуемая в ЭВМ для ротора, представлена в виде таблицы.

Значимость результатов работы заключается в обеспечении единой методологической основы моделирования технологического оборудования, в разработке алгоритмического, информационного и программного обеспечения подсистем системы управления техническим осмотром и ремонтами оборудования.

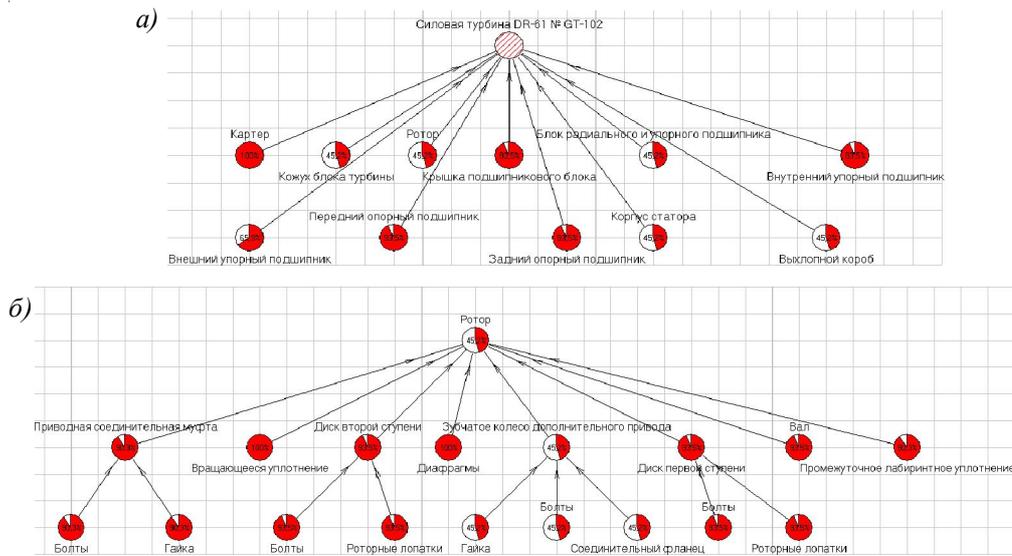


Рис. 5. Граф-модели наработок и остаточных ресурсов «Силовая турбина DR-61 № GT-102» и «Ротора» на 22 ноября 2013 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыров, А. А. Графовые методы в задачах моделирования и исследования интегрированных систем управления / А. А. Кадыров, А. А. Кадырова. – Ташкент: ЯНГИ АСР АВЛОДИ, 2011. – 186 с.

2. Кадырова, А. А. Методы моделирования и исследования нелинейных и логико-динамических систем управления / А. А. Кадырова. – Ташкент: ЯНГИ АСР АВЛОДИ, 2010. – 186 с.

3. Качество управления производством с позиций синергетики / Л. М. Семенова, В. Б. Хлебников, Ю. С. Бахрачева, С. В. Семенов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2012. – № 7. – С. 120–126.

4. Семенова, Л. М. Анализ закономерностей последовательного развития явлений самоорганизации на предприятиях / Л. М. Семенова, В. Б. Хлебников, Ю. С. Бахрачева // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2013. – № 2. – С. 49–56.

## REFERENCES

1. Kadyrov A.A., Kadyrova A.A. *Grafovye metody v zadachakh modelirovaniya i issledovaniya integrirovannykh sistem upravleniya* [The Graph

Methods of Modeling and Research of Integrated Control Systems]. Tashkent, YANGI ASR AVLLODI Publ., 2011. 186 p.

2. Kadyrova A.A. *Metody modelirovaniya i issledovaniya nelineynykh i logiko-dinamicheskikh sistem upravleniya* [The Methods of Modeling and Research of Nonlinear and Logical and Dynamic Control Systems]. Tashkent, YANGI ASR AVLLODI Publ., 2010. 186 p.

3. Semenova L.M., Khlebnikov V.B., Bakhraчева Yu.S., Semenov S.V. *Kachestvo upravleniya proizvodstvom s pozitsiy sinergetiki* [The Quality of Production Management From Synergetics Perspective]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovatsionnaya deyatel'nost* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and Innovations], 2012, no. 7, pp. 120-126.

4. Semenova L.M., Khlebnikov V.B., Bakhraчева Yu.S. *Analiz zakonomernostey posledovatel'nogo razvitiya yavleniy samoorganizatsii na predpriyatiyakh* [The Analysis of Regularities of Consecutive Development of Self-Organization Phenomena at Enterprises]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovatsionnaya deyatel'nost* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and Innovations], 2013, no. 2, pp. 49-56.

## MODELLING OF COMPLEX TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF ENTERPRISES ON THE BASIS OF DYNAMIC GRAPHS

**Kadyrova Aziza Amanullaevna**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of Cross-Industry Center for Strategic Innovations and Informatization  
aziza.kaa@innovation.uz  
Universitetskaya St., 2, 100095 Tashkent, Uzbekistan

**Kadyrov Amir Amanullaevich**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Cross-Industry Center for Strategic Innovations and Informatization  
amir.kadirov@gmail.com  
Universitetskaya St., 2, 100095 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** The article contains the graphodynamic method of modeling complex technological objects of enterprises. The economic efficiency of any industrial enterprise largely depends on the reliable operation of main equipment. The decomposition of technological equipment into interrelated units and details allows using dynamic graphs as mathematical models. This article develops the algorithm of finding the schedules of equipment repair and the complex of dynamic graph models of the system controlling the technical inspection and equipment repair.

**Key words:** structural methods of modeling, technological equipment, dynamic graph, discreteness, decomposition.