

УДК 621.311.1

к вопросу создания информационной базы данных по надежности основного оборудования ТЭС

*Докт. техн. наук, проф. КАРНИЦКИЙ Н. Б.¹⁾, магистр техн. наук БУРОВ А. Л.¹⁾,
инженеры ВЕРЕМЕЙЧИК Е. Г.¹⁾, КАРПУК А. В.²⁾*

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾ОАО «БПС-Сбербанк»

Несмотря на определенные экономические трудности, в настоящее время значительное внимание уделяется дальнейшему развитию электроэнергетической отрасли Республики Беларусь. Вводятся в строй новые электроэнергетические мощности на органическом топливе, начато строительство первой Белорусской АЭС. При этом должного внимания требует то оборудование ТЭС, которое исчерпало свой парковый ресурс. В энергосистеме Беларуси его доля составляет порядка 55 % при установ-

ленной мощности $N_{уст} = 8525$ МВт. Поддержание работоспособности такого оборудования требует не только капиталовложений, но прежде всего информационного обеспечения о состоянии отдельных узлов, агрегатов, определяющих надежную работу паровых котлов и турбин в целом. Не следует забывать, что это оборудование в стратегической перспективе (после ввода АЭС) перейдет в утяжеленный режим работы, связанный с перераспределением сегмента графика электрических нагрузок,

т. е. переходом из базовой части графика в полупиковую и пиковую.

Кроме того, Белорусская энергосистема все в большей степени оснащается газотурбинными установками в составе ПГУ. По мнению авторов, о таких установках также необходимо иметь оперативную информацию по надежности их работы, поскольку даже новые ПГУ-400 на Лукомльской и Березовской ГРЭС своими режимами эксплуатации существенно будут отличаться от принятых при проектировании.

Основной задачей энергетики Республики Беларусь было и остается надежное снабжение потребителей электроэнергией и теплотой. При этом следует учесть, что в процессе энергообеспечения устаревает оборудование, возникают ошибки эксплуатационного персонала, а также в перспективе – ожидание оперативного включения мощностей в случае отказа или планового останова мощных энергоблоков АЭС, работающих в базовой части электрических нагрузок.

В силу указанных причин компенсация электрических мощностей должна осуществляться повышением или, по крайней мере, сохранением их надежности на требуемом уровне. Это возможно путем создания резервов производственных мощностей, запасов топливных ресурсов при улучшении культуры эксплуатации оборудования электростанций и др.

В этой связи для лица, принимающего решения (ЛПР), или группы лиц важна информация о техническом состоянии действующего энергетического оборудования, в частности основного оборудования электростанций на органических видах топлива.

На кафедре «Тепловые электрические станции» БНТУ разработана информационная система по формированию базы данных надежности оборудования ТЭС. Она включает только базовые электростанции, но может быть расширена при необходимости до требуемых масштабов. По мнению авторов, актуальным представляется примененный системный подход к оценке технического состояния, уровня эксплуатации, аварийности оборудования ТЭС с целью принятия решений по повышению (сохранению) его надежности на основе созданной информационной системы (ИС), а в рамках ГПО «Белэнерго» с ее использованием

может быть создана корпоративная информационная система (КИС).

Предлагаемая информационная система универсальна и может быть адаптирована к другой аналогичной структуре. В данной статье авторами сохранена культура подачи информации, не ущемляющая корпоративных интересов энергоисточников и энергосистемы в целом. Основное внимание уделено технической стороне вопроса по раскрытию сути построения ИС. Далее предлагаемый материал построен именно в этом ключе.

Прежде всего, для разработки ИС требуется стартовая информация по анализируемой системе. В частности, информация по основным техническим данным паровых котлов и турбин ТЭС с указанием даты их ввода в эксплуатацию, конкретного количества пуско-остановов, числа часов наработки, времени нахождения в ремонте и резерве на данный момент.

При формировании данных была предусмотрена система структуры базовых ТЭС с учетом их пополнения новыми энергоисточниками (свободные блоки). Название энергетического объекта предусматривало максимальное количество букв (до 30). Аналогично были предусмотрены расширенные ячейки для записи наиболее емких названий и терминов, чтобы это в перспективе не требовало сложной корректировки исходной структуры, описания агрегатов, узлов, деталей и т. п. То есть создаваемый алгоритм базы данных по надежности имеет существенный запас как в структуре энергосистемы (при вводе новых тепловых электростанций), так и при описании отказов, их причин и других сведений для расчета показателей надежности. Таким образом, уже в начале исследований закладывались решения по созданию базы данных по надежности, которые были формализованы на наиболее сложные цепочки при описании отказов тепломеханического оборудования.

Формализация отказов основного оборудования ТЭС осуществлена на основе формуляра акта расследования отказа (аварии), произошедшего на оборудовании ТЭС, фиксируемого существующей системой учета. То есть поступающая информация может быть сосредоточена в одном месте, например в службе надежности энергетической структуры.

Наряду с информационным обеспечением ИС позволяет рассчитывать и показатели надежности на момент востребованности. Для этого в программе расчетов положена общеизвестная методика [1], краткое описание которой приведено ниже.

Энергетическая схема электростанции состоит из множества компонент, среди которых главными являются: котел, турбина, электрогенератор, дымососы, дутьевые вентиляторы, главные паропроводы, питательные, конденсатные и циркуляционные насосы, деаэраторы, подогреватели высокого и низкого давления и др.

При оценке надежности схем энергоблоков и ТЭС с поперечными связями такие показатели, как средняя наработка на отказ оборудования, а также среднее время восстановления работоспособного состояния, связаны с неопределенностью [2, 3]. Средняя наработка на отказ T_0 – это отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки; среднее время восстановления работоспособного состояния T_b – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния.

В обработке ретроспективных данных по отказам с целью оценки надежности тепломеханического оборудования ТЭС были использованы методы аналитического моделирования, марковские процессы и как наиболее часто применяемое в энергетике экспоненциальное распределение. В этом случае интегральная функция распределения может быть представлена как

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0. \quad (1)$$

Здесь эта функция используется для выражения вероятности отказов. В теории надежности часто применяется и обратная функция – вероятность выживания $R(t) = 1 - F(t)$.

Производная кумулятивной функции распределения вероятности отказов называется вероятностной функцией плотности $f(t)$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} = -\frac{dR(t)}{dt}; \quad t > 0. \quad (2)$$

Склонность к отказу может быть охарактеризована функцией риска

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad (3)$$

которая для экспоненциального распределения принимает вид

$$h(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})} = \lambda, \quad (4)$$

где λ – интенсивность или параметр потока отказов, выражающий отношение среднего числа отказов объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки и являющийся величиной, обратной наработке на отказ $1/T_0$.

Проблемы надежности в энергетике связаны с марковскими процессами, которые дискретны в пространстве и непрерывны во времени. Системы, описываемые этими процессами, существуют непрерывно в одном из состояний (работа) до дискретного перехода в другое состояние (ремонт).

Марковские процессы описывают системы, которые могут быть лишь в одном из взаимоисключающих дискретных состояний. Изменения от состояния к состоянию непрерывны во времени, а вероятность более чем одного изменения состояния в течение малого промежутка времени Δt незначительна.

Если система находится в состоянии «работа», то

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (5)$$

где μ – интенсивность ремонтов, определяется как $1/T_b$.

Для состояния «отказ»

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (6)$$

Для времени $t = 0$: $P_0(0) = 1$; $P_1(0) = 0$.

Для времени $t = \infty$:

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \quad (7)$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (8)$$

Подставив значения $T_o = \frac{1}{\lambda}$ и $T_b = \frac{1}{\mu}$ в выражения (7) и (8), будем иметь:

$$K_{\text{гот}} = P_o = \frac{T_o}{T_o + T_b}; \quad (9)$$

$$K_{\text{негот}} = P_1 = \frac{T_b}{T_o + T_b}. \quad (10)$$

Показатели P_o и P_1 в (9) и (10) не зависят от первоначального состояния системы, их величины характеризуют стационарные значения готовности $K_{\text{гот}}$ и неготовности $K_{\text{негот}}$ системы.

Для анализа рассмотрим диаграмму состояний двухкомпонентной системы (рис. 1).

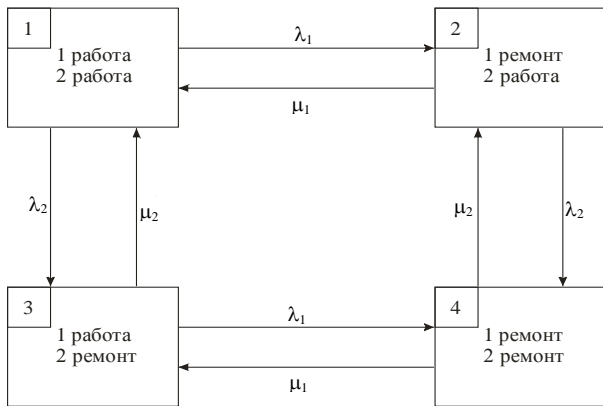


Рис. 1. Диаграмма состояний

Для такой простейшей системы $K_{\text{гот}}$ и $K_{\text{негот}}$ выражаются:

а) при последовательном соединении компонент:

$$K_{\text{гот}} = P_1; \quad K_{\text{негот}} = P_2 + P_3 + P_4;$$

б) при параллельном соединении:

$$K_{\text{гот}} = P_1 + P_2 + P_3; \quad K_{\text{негот}} = P_4.$$

Уравнения для двухкомпонентной системы запишутся:

а) при последовательном соединении:

• двух компонент:

$$K_{\text{гот}} = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_2)(\lambda_2 - \mu_2)}; \quad (11)$$

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (12)$$

$$T_b \cong \frac{\lambda_1 T_{b1} + \lambda_2 T_{b2}}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (13)$$

$$K_{\text{негот}} \cong \lambda_1 T_{b1} + \lambda_2 T_{b2}; \quad (14)$$

• n компонент:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad (15)$$

$$T_b = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i T_{bi}}{\lambda}; \quad (16)$$

$$K_{\text{негот}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{bi}; \quad (17)$$

б) при параллельном соединении двух компонент:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 (T_{b1} + T_{b2}); \quad (18)$$

$$T_b = \frac{T_{b1} T_{b2}}{T_{b1} + T_{b2}}; \quad (19)$$

$$T_{\text{негот}} = \lambda T_b = \lambda_1 \lambda_2 T_{b1} T_{b2}. \quad (20)$$

В параллельной системе, состоящей из n компонент, невозможно использовать уравнения для двухкомпонентной системы. Поэтому в параллельных системах с n компонентами при расчетах поочередно объединяют две компоненты с последующим добавлением к результатам предыдущих расчетов показателей следующей компоненты и последующих расчетов. Если схема ТЭС включает 20 компонент, то количество сочетаний («работа – отказ») будет $2^{20} = 1000000$ сочетаний.

Учитывая то обстоятельство, что схемы энергоблоков и ТЭС с поперечными связями гораздо сложнее и состоят из сотен компонент, потребовалось решение, направленное на упрощение процедуры перебора сочетаний без существенного снижения точности расчетов. Одним из авторов этой статьи ранее было предложено укрупнение расчетных блоков при соблюдении высокой точности конечного результата. Подробное описание оценки показателей приведено в [1], в этой статье лишь реферативно изложена суть проблемы.

Методика оценки надежности энергетической схемы блока или электростанции включает следующие шаги: 1 – разработка компонентной схемы энергоблока (электростанции с

поперечными связями); 2 – оценка показателей T_o и T_b компонент (в рассматриваемом случае эти величины были приведены в актах регистрации отказов, журналах учета отказов и т. п.); 3 – определение подсистем; 4 – определение групп подсистем; 5 – построение деревьев отказов подсистем; 6 – расчет показателей готовности подсистем; 7 – определение мощностей состояний подсистем и групп подсистем; 8 – определение сочетаний подсистем и оценка их готовности при соответствующем сочетании. Таким образом, схема энергоблока, состоящая из 21 компоненты, требующая $2^{21} = 2097152$ сочетаний, в результате агрегирования в девять подсистем позволила уменьшить количество расчетных сочетаний с 2097152 до 1024. Агрегирование ряда подсистем в группы подсистем приводит к сокращению сочетаний до 64. Ряд операций по совмещению мощностей подсистем привели только к 10 расчетным состояниям, определение которых несложно даже при ручных вычислениях. Шаг 9 – определение основных показателей готовности энергоблока

и шаг 10 – анализ показателей готовности энергоблока – завершают процедуру расчетов.

Предложенная в работе компьютерная программа позволяет извлекать из базы данных необходимые сведения для расчета текущего значения коэффициента готовности.

Приведенная база данных по отказам основного тепломеханического оборудования электростанций энергосистемы Республики Беларусь удобна для электронной обработки информации, выборки отдельных параметров, занесения новой информации (в том числе с помощью обычного текстового редактора NOTEPAD). Однако для понимания значения данных без участия компьютера требуются некоторые пояснения.

Исходные данные обычно сводятся в таблицу. В рассматриваемом случае это табл. 1.

Далее приведем краткое описание инструкции пользователя.

При помощи программы пользователь может:

- просмотреть список всех отказов, которые случались на электростанциях (список отсортирован по дате, названиям станций и элементов их оборудования);

Таблица 1

Пример таблицы исходных данных

Название станции	Тип турбоагрегата	Стационарный номер турбоагрегата	Тип котлоагрегата	Стационарный номер котлоагрегата	Элемент агрегата, виновный в отказе	Категория отказа	Дата отказа	Время простоя агрегата	Описание отказа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	ПЭН	1	19.12.1986	000004.30	Останов блока № 4 Т-250/300-240 защитой по снижению давления в системе смазки ПЭНа из-за ошибочного действия персонала цеха ТАИ
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	ВЭ	1	23.12.1986	000029.00	Отключение блока № 4 Т-250/300-240 из-за повреждения сварного стыка трубы входного коллектора водяного экономайзера котлоагрегата ТГМП-344А
МТЭЦ-4	ПТ-60	1	БКЗ-420-140 НГМ	1	Подшипник № 3	1	27.01.1987	000111.00	Останов котла № 1 (БКЗ-420-140 НГМ) по отключению ВДН-25х2 из-за повреждения подшипника № 3
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	Турбина	1	02.02.1987	000070.00	Останов блока № 4 Т-250/300-240 защитой по осе-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	Генератор	1	05.02.1987	000072.00	Останов блока № 4 Т-250/300-240 по отключению генератора ТВВ-320-243 продольной дифзащитой
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	Турбина	1	09.02.1987	000003.00	Останов блока № 4 Т-250/300-240 защитой по осевому сдвигу ротора турбины
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	ПТН	1	22.02.1987	000071.00	Отключение ПТН блока № 4 Т-250/300-240 защитой по осевому сдвигу турбины (ПТН-1100-350-24)
МТЭЦ-4	T-250	4	ТГМП-344А	4	ПЭН	1	23.02.1987	00002.00	Останов блока № 4 Т-250/300-240 по отключению ПЭНа из-за повышения температуры подшипника № 2 электродвигателя

Окончание табл. 1

- получить информацию об отказах на отдельной станции или ее элементе (котле, турбине), а также по типу турбины или котла за выбранный период, просмотреть отчет о количестве неисправностей, наработке и коэффициенте готовности;

- вносить изменения в базу данных программы: добавлять новые записи, редактировать и удалять существующие;

- изменять информацию о составе станций и основного оборудования: добавлять новые и удалять закрытые станции и оборудование, изменять информацию о них (сроки ввода в эксплуатацию, тип и т. д.).

Для запуска программы используется файл с *bd.exe*. Загружается главная форма – «База данных происшествий на электрических станциях» (рис. 2).

Для того чтобы просмотреть список всех неисправностей, достаточно нажать на кнопку «База данных». Появится окно «Информация», содержащее таблицу с данными (рис. 3).

Чтобы получить список неисправностей по какой-либо одной станции или по одному элементу (котлу, турбине), перед нажатием кнопки «Выполнить» необходимо:

- в логическом блоке «Критерий» выставить флажок перед тем предложением, которое наиболее подходит;

- в блоке «Способ отображения информации» выставить флажок перед «Все данные и общие сведения», если необходимо просмотреть список неисправностей и получить статистический отчет по неисправностям, связанным с выбранным элементом в блоке «Критерий»; выставить флажок перед «Все данные в виде таблицы», если достаточно просто просмотреть список неисправностей, и перед «Общие сведения по элементу», если необходимо ознакомиться только со статистическими данными (время простоя, количество неисправностей, наработка на отказ). Далее надо ввести название станции, котла, турбины или номер в поле, находящемся ниже;

реть список неисправностей и получить статистический отчет по неисправностям, связанным с выбранным элементом в блоке «Критерий»; выставить флажок перед «Все данные в виде таблицы», если достаточно просто просмотреть список неисправностей, и перед «Общие сведения по элементу», если необходимо ознакомиться только со статистическими данными (время простоя, количество неисправностей, наработка на отказ). Далее надо ввести название станции, котла, турбины или номер в поле, находящемся ниже;

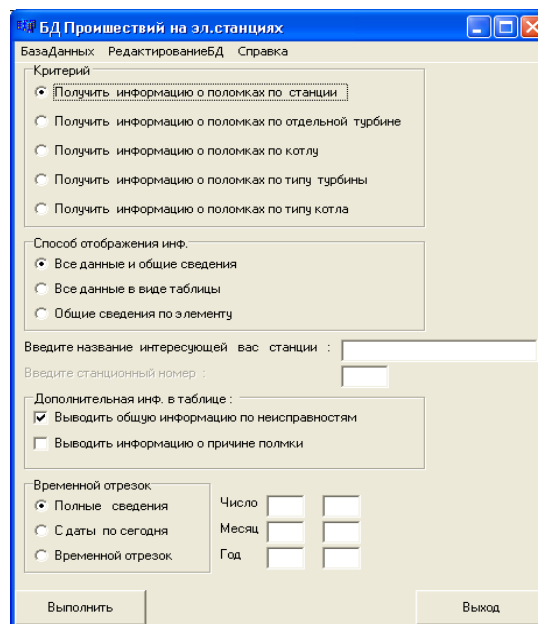


Рис. 2. Главная форма программы

No.	Станция	Турбина	Ст. No.	Котел	Ст. No.	Элемент Котла	Степ. отк.	Дата Полом	Время Про	Инф. об отказе
1	МТЭЦ-4	T-250	06	ТГМП-344А	06	ДС-6А	1	28 05 1996	000045 00	Повышение температуры 2-го подш
2	МТЭЦ-4	T-250	06	ТГМП-344А	06	Г-24	1	27 04 1996	000019 30	Блок № 6 Т-250/300-240 отключилс
3	МТЭЦ-4	T-250	05	ТГМП-344А	05	ошибочные действия	1	25 04 1996	000025 30	На блоке № 5 Т-250/300-240 при пе
4	МТЭЦ-4	T-250	05	ТГМП-344А	05	ЦВД	1	06 04 1996	000054 00	Два игольчатых свища по угловом
5	МТЭЦ-4	T-250	04	ТГМП-344А	04	пробоотборная трубка	1	01 04 1996	000018 00	Сквозная кольцевая трещина по э
6	МТЭЦ-4	T-250	05	ТГМП-344А	05	генератор	1	27 03 1996	000121 00	Отключен блок № 5 Т-250/300-240 i
7	МТЭЦ-4	T-250	06	ТГМП-344А	06	ДВ-6Б	1	25 03 1996	000020 00	Разрушение первого подшипника н
8	МТЭЦ-4	T-250	04	ТГМП-344А	04	ОПИ-А	1	21 02 1996	000006 00	Раскрытие участка трубы между ш
9	МТЭЦ-4	T-250	06	ТГМП-344А	06	ДВ-6Б	1	19 02 1996	000058 00	На электродвигателе ДВ-6Б блока
10	МТЭЦ-4	T-100	03	БКЗ-420-140 НГМ	03	возбудитель	1	13 02 1996	000010 00	Причиной повреждения заднего по
11	МТЭЦ-4	T-250	06	ТГМП-344А	06	МПУ	1	29 01 1996	000009 00	Задержка пуска блока № 6 Т-250/3
12	МТЭЦ-4	T-110	02	БКЗ-420-140 НГМ	02	пильный вентилятор	1	08 01 1996	000088 00	Постанов котла № 2 БКЗ-420-140 НГ

Рис. 3. Форма программы «Информация»

- в блоке «Дополнительная информация в таблице» оставить первый флажок, если необходимо, чтобы в таблице отображалась такая информация, как время простоя, степень отказа, дата неисправности, и установить второй флажок, если нужно отображение информации о причине поломки;

- в блоке «Временной отрезок» выставить флажок перед «Полные сведения», если нужна вся информация, имеющаяся в базе данных; «С даты по сегодня», если нужна информация с определенного момента времени; «Временной отрезок», если нужна информация за конкретный период времени. Данные вносятся в поле «Число», «Месяц», «Год».

Для редактирования информации в базе данных возможны два варианта:

- находясь на главной форме, нажать кнопку «База данных». Появится форма «Информация», содержащая таблицу данных и кнопки.

При необходимости добавить запись нажимается соответствующая кнопка «Добавить запись», а затем в появившейся форме «Редактирование базы данных» последовательно заполняются все поля с названием станции, типом турбины, котлоагрегата, названием элемента, станционного номера, даты поломки, времени простоя, информации по отказу, а потом нажимается кнопка «Добавить». Если необходимо изменить какую-либо запись, то следует нажать на кнопку «Редактировать» – появится форма «№ записи». В окне нужно указать номер записи,

в которую требуется внести изменения, и нажать на кнопку «Редактировать» – появится форма «Редактирование базы данных» с ранее введенными в поле записями. После исправления записей нажать кнопку «Изменить». Если редактирование больше не требуется, то надо закрыть окно или нажать на кнопку «Выход». Если необходимо полностью удалить запись, то надо нажать на кнопку «Удалить» и в появившемся окне ввести номер удаляемой записи, после чего повторно нажать на кнопку «Удалить»;

- находясь на главной форме, нажать на верхней панели «Редактирование базы данных», затем «Редактирование данных», «Добавить»/«Удалить». Появляется форма «Редактирование базы данных» (рис. 4). Заполнить все поля соответствующей информацией, затем нажать «Добавить» или «Удалить».

Для изменения информации о составе станций необходимо, находясь на главной форме, нажать «Редактирование базы данных», затем «Изменение структуры», затем «Добавить»/«Изменить». Появляется окно «Изменение технических данных». В логическом блоке «Элемент» выбрать информацию об элементе, который требуется заменить (станция, котел или турбина). Затем ввести название станции. Если изменяем (добавляем) информацию о котле (турбине), то ввести также их станционный номер. Если изменяем информацию о станции, нужно нажать на кнопку «Добавить»/«Изменить», если о котле или турбине, то нажать на кнопку «ОК» и в таб-

лице активируются поля «Тип», «Блок», «Дата ввода» – внести необходимую информацию. Затем для завершения операции нажать на кнопку «Добавить»/«Изменить».

Расчетные данные программы отображаются в форме «Сведения о времени наработки» (рис. 4).

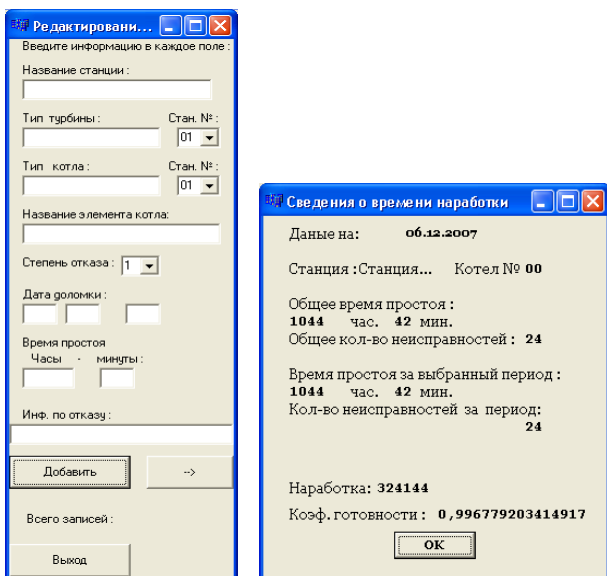


Рис. 4. Формы программы «Редактирование базы данных» и «Сведения о времени наработки»

В программе реализовано более пятидесяти функций, отвечающих за работу видимых компонент, выборку, сортировку, изменение, удаление, добавление, редактирование данных, нахождение интересующей величины и т. д. Использовано более десяти классов объектов и более пятисот переменных, не видимых для пользователя.

ВЫВОДЫ

1. Проведена систематизация отказов различной степени, позволившая создать основу базы данных по надежности тепломеханического оборудования базовых электростанций Республики Беларусь.

2. Разработана информационная система с использованием современных компьютерных технологий, позволяющая осуществлять ввод текущих данных по отказам с записью истории отказа, производить выборку типа отказавшего оборудования с выделением «слабых» узлов и агрегатов, рассчитывать текущий коэффициент готовности основного оборудования ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борушко, А. П.** Рекомендации по оценке показателей безотказности, ремонтпригодности и готовности энергетических блоков (агрегатов) электростанций / А. П. Борушко, Г. А. Борушко, Н. Б. Карницкий. – М.: СПО «ОРГРЭС», 1991. – 48 с.
2. **Борушко, А. П.** Надежность и эффективность электростанций: методы и практика: учеб.-метод. пособие по дисциплине «Надежность оборудования ТЭС» / А. П. Борушко, Г. А. Борушко, Н. Б. Карницкий. – Минск: БНТУ, 2007. – 182 с.
3. **Карницкий, Н. Б.** Синтез надежности и экономичности теплоэнергетического оборудования ТЭС / Н. Б. Карницкий. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 227 с.

Поступила 25.01.2012