

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье рассматривается предложенная авторами имитационная статистическая модель (ИСМ), которая предназначена для прогнозирования показателей надежности (ПН) и показателя стоимости эксплуатации (ПСЭ) объекта радиоэлектронной техники (РЭТ) с учетом его конструктивной структуры, параметров системы технического диагностирования (СТД) и системы технического обслуживания (СТО). В качестве ПН были приняты стандартные показатели: средняя наработка на отказ, коэффициент готовности и др. В качестве ПСЭ была принята удельная стоимость эксплуатации объекта.

Предполагается, что ИСМ будет применяться главным образом на этапах разработки объекта РЭТ. По результатам, получаемым с помощью ИСМ, могут быть приняты обоснованные решения по выбору структуры и конструкции объекта, и определены оптимальные параметры СТД и СТО. ИСМ была реализована программно с помощью средств системы программирования Delphi. Приводятся формы представления входной и выходной информации модели.

Ключевые слова: объект радиоэлектронной техники, показатели надежности, параметры объекта радиоэлектронной техники, имитационное статистическое моделирование, техническое обслуживание и ремонт.

Введение. Постановка задачи. Под объектами радиоэлектронной техники (РЭТ) понимаются технические устройства, состоящие преимущественно из элементов, являющихся изделиями электронной техники (микросхемы, конденсаторы, резисторы, полупроводниковые приборы и т.д.). В составе объекта РЭТ могут быть также механические, электромеханические, гидравлические или другие не электронные элементы. Типичным примером объекта РЭТ может служить радиолокационная станция.

Объекты РЭТ, как правило, предназначаются для длительного многократного использования (десятки лет) и затраты на их эксплуатацию могут быть сопоставимы, или даже превышать затраты на создание объекта. Поэтому представляется весьма важным иметь возможность уже на этапе разработки объекта прогнозировать для него ожидаемые в будущем показатели надежности (ПН) и стоимости эксплуатации (СЭ). Известно, что ПН и СЭ объекта, с одной стороны, полностью определяются его характеристиками и свойствами, «заложеными» при его создании, но, с другой стороны, зависят также и от полноты и качества технического обслуживания (ТО) объекта в процессе его эксплуатации. При этом важно понимать, что эффективность ТО будет существенно зависеть от того, насколько конструкция объекта приспособлена к выполнению работ ТО, насколько оптимально выбраны параметры (объемы и сроки) выполнения этих работ. Таким образом, очевидно, что необходима математическая модель, с помощью которой было бы возможно уже на этапе разработки объекта РЭТ прогнозировать ПН и СЭ с учетом выбираемых разработчиком состава и конструкции объекта, параметров встроенной системы технического диагностирования (СТД), системы технического обслуживания (СТО). Модель эта должна включать в себя в качестве параметров все наиболее важные характеристики объекта РЭТ и параметры СТД и СТО. Реализовать такую модель аналитическими методами из-за ее сложности вряд ли представляется возможным, поэтому наиболее естественным для ее разработки является использование метода имитационного статистического моделирования [1]. В статье в кратком изложении описывается имитационная статистическая модель (ИСМ), реализованная программно и описанная ранее в монографии [2].

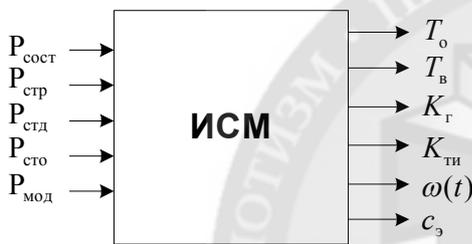
Входная и выходная информация модели. В качестве основных результатов моделирования с помощью ИСМ получают оценки следующих ПН и СЭ:

- T_o - средняя наработка на отказ;
- T_v - среднее время восстановления;
- K_r - коэффициент готовности;
- $K_{ти}$ - коэффициент технического использования;
- c_3 - удельная стоимость эксплуатации объекта.

Исходной информацией для модели являются характеристики объекта РЭТ (включающие параметры СТД и СТО), влияющие на перечисленные выше показатели. Все исходные данные сгруппируем в виде следующих обобщенных параметров:

- $P_{сост}$ - состав объекта, ПН и стоимости комплектующих элементов;
- $P_{стр}$ - параметры конструктивной и надежностной структуры объекта;
- $P_{стд}$ - параметры СТД;
- $P_{сто}$ - параметры СТО.

Кроме указанных обобщенных параметров к исходной информации следует отнести



также параметры моделирования $P_{мод}$, задающие условия и режимы моделирования. На рис. 1 в наглядной форме изображены «входы» и «выходы» модели. В составе выходной информации показана также функция параметра потока отказов $\omega(t)$ несущая важную информацию о предполагаемой динамике уровня безотказности объекта РЭТ на заданном интервале его эксплуатации.

Рис. 1. «Входы» и «выходы» модели.

Для понимания возможностей ИСМ необходимо рассмотреть содержание введенных

обобщенных параметров. Содержание этих параметров следующее:

$$P_{сост} = \left\{ E_o, \left\{ T_{срi}, v_i, s_i, n_i, C_{0i}, \tau_{замi}, C_{замi}; i = \overline{1, |E_o|} \right\} \right\}, \quad (1)$$

где $E_o = \{e_i\}$ - множество элементов объекта, включаемых в структурную схему надежности (ССН) объекта; множество E_o будем называть также множеством «отказывающих» элементов – отказывающих в том смысле, что в ИСМ явно имитируются отказы только элементов, включенных в множество E_o ;

$T_{срi}$ - средняя наработка до отказа элемента e_i ;

v_i - коэффициент вариации случайной наработки до отказа элемента e_i ;

s_i - признак типа структуры элемента: 0 – простой элемент; 1 – группа последовательно соединенных одинаковых элементов; $2 \vee 3$ – группа параллельно соединенных одинаковых элементов (2 – постоянное резервирование; 3 – замещающее резервирование);

n_i - число элементов в группе (если $s_i = 0$, то $n_i = 1$);

C_{0i} - стоимость элемента e_i ;

$\tau_{замi}$ - среднее время замены элемента e_i ;

$C_{замi}$ - стоимость операции замены элемента e_i ;

$|E_o|$ - число элементов в множестве E_o ;

$$P_{стр} = \{G\} = \{ \langle E, V \rangle \}, \quad (2)$$

где $G = \langle E, V \rangle$ - граф (дерево), определяющий конструктивную структуру объекта: E - множество вершин графа, обозначающих все конструктивные элементы объекта; V - множество дуг, соединяющих вершины графа и определяющих отношение вхождения элементов нижних уровней в соответствующие элементы более высокого конструктивного уровня. На рис. 2 дерево конструктивной структуры объекта G изображено графически. Прямоугольниками показаны составные конструктивные элементы, кружками – элементы нижнего конструктивного уровня. В обозначении элементов e_i^u верхний индекс условимся использовать для указания конструктивного уровня элемента, нижний индекс – для внутренней нумерации элементов.

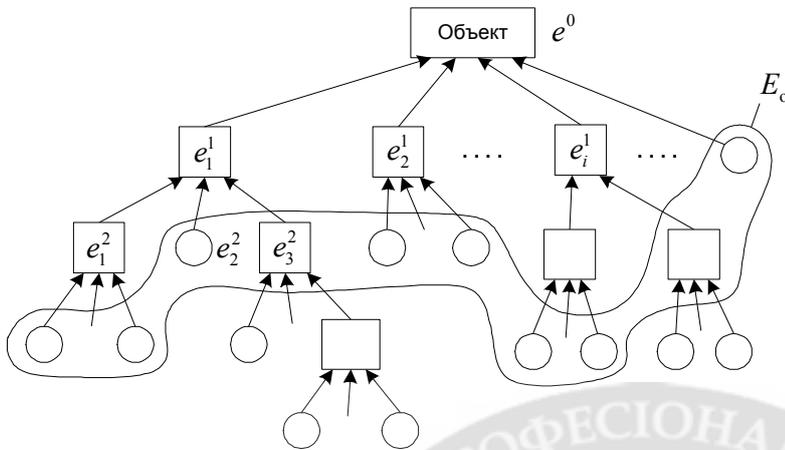


Рис. 2. Дерево конструктивной структуры объекта РЭТ.

Нумерация конструктивных уровней осуществляется сверху вниз. С учетом этого объект в целом представляется как элемент e^0 . Все элементы e_i^{u+1} , входящие в состав элемента e_i^u , считаются соединенными в смысле надежности последовательно. Для обеспечения корректности расчетов, множество отказывающих элементов E_0 ($E_0 \subset E$) должно удовлетворять следующему условию: пересечение любого пути, связывающего элемент нижнего уровня с множеством E_0 , должно содержать не более одного элемента. Информация о принадлежности элемента e_i^u множеству E_0 задается в исходных данных модели. Указанные требования к множеству E_0 обеспечиваются автоматически (программно) при вводе исходной информации о конструктивной структуре объекта.

$$P_{\text{стд}} = \{E_{\text{в}}, \tau_{\text{кр}}, C_{\text{кр}}, \tau_{\text{пн}}, C_{\text{пн}}\}, \quad (3)$$

где $E_{\text{в}}$ - множество восстанавливаемых элементов (определяет глубину диагностирования, обеспечиваемую СТД); в случае отказа объекта СТД определяет место отказа с точностью до элемента из множества $E_{\text{в}}$ ($E_{\text{в}} \subset E$);

$\tau_{\text{кр}}$ и $C_{\text{кр}}$ - средняя продолжительность и стоимость операции контроля работоспособности (КР) объекта;

$\tau_{\text{пн}}$ и $C_{\text{пн}}$ - средняя продолжительность и стоимость операции поиска неисправности в случае отказа объекта;

$$P_{\text{сто}} = \{E_{\text{то}}, U_{\text{то}}, T_{\text{ктс}}, \tau_{\text{ктс}}, C_{\text{ктс}}, \{\tau_{\text{то}i}, C_{\text{то}i}; i = \overline{1, |E_{\text{то}}|}\}\}, \quad (4)$$

где $E_{\text{то}}$ - множество обслуживаемых элементов ($E_{\text{то}} \subset E_0$);

$U_{\text{то}} = \{u_{\text{то}i}\}$ - множество (вектор) граничных значений уровня ТО для определяющих параметров обслуживаемых элементов ($|U_{\text{то}}| = |E_{\text{то}}|$);

$T_{\text{ктс}}$, $\tau_{\text{ктс}}$ и $C_{\text{ктс}}$ - периодичность, продолжительность и стоимость контроля технического состояния объекта соответственно;

$\tau_{\text{то}i}$ и $C_{\text{то}i}$ - продолжительность и стоимость операции по обслуживанию i -го элемента $e_i \in E_{\text{то}}$ ($i = \overline{1, |E_{\text{то}}|}$);

Содержание параметра $P_{\text{сто}}$ может изменяться в зависимости от выбранной стратегии проведения ТО (см. [2]). Приведенное выражение (4) соответствует стратегии ТО по

состоянию, при которой время проведения ТО жестко не планируется. В случае же стратегии регламентированного ТО (ТО по ресурсу) время проведения ТО планируется с заданной фиксированной периодичностью T_0 ;

$$P_{\text{мод}} = \{T_3, Dt, \varepsilon^{\text{TP}}, N_I\}, \quad (5)$$

где T_3 - период времени эксплуатации объекта, для которого осуществляется прогнозирование ПН и СЭ;

Dt - интервал накопления статистики (для получения оценки функции $\omega(t)$);

ε^{TP} - требуемая точность (относительная ошибка) результатов моделирования;

N_I - максимальное число реализаций моделирования (используется в случае, если требуемая точность ε^{TP} не достигается).

Вся рассмотренная информация вводится и сохраняется в базе данных (БД) модели.

Структура алгоритма моделирования.

В ИСМ имитируется случайный процесс, который можно описать графом состояний и переходов, представленным на рис. 3. Согласно этому графу объект в каждый момент времени может находиться в одном из следующих состояний:

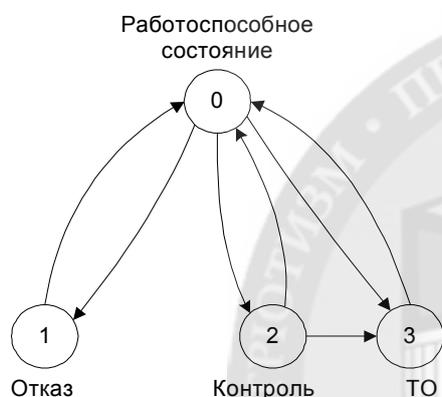


Рис. 3. Граф состояний и переходов моделируемого процесса.

0 - работоспособное (или исправное) состояние; в этом состоянии объект применяется по назначению;

1 - состояние отказа; в этом состоянии производится ремонт (восстановление) объекта;

2 - производится контроль технического состояния объекта;

3 - состояние ТО (выполняются работы по ТО).

Переходы между состояниями происходят в случайные или детерминированные моменты времени. Для такого процесса, в принципе, можно было бы разработать аналитическую модель, например, в виде

системы дифференциальных уравнений Колмогорова [3], однако, практическая реализация такой модели была бы весьма затруднительной. Главная трудность заключается в том, что для такой модели необходимо получить аналитические выражения (формулы) для интенсивностей переходов между состояниями процесса, которые должны быть функциями от рассмотренных выше параметров объекта и параметров СТД и СТО. Для получения таких функций могут потребоваться отдельные достаточно сложные модели. В результате модель в целом может оказаться весьма громоздкой и неэффективной, мало пригодной для практики.

Относительно простым способом решения поставленной задачи – получения оценок ПН и СЭ с учетом зависимости их от рассмотренных выше параметров СТД и СТО является применение метода имитационного статистического моделирования [1]. В формате статьи нет ни возможности, ни необходимости рассматривать все детали реализации ИСМ, поэтому рассмотрим только укрупненную структурную схему основного алгоритма моделирования (рис. 4). Работа алгоритма кратко состоит в следующем.

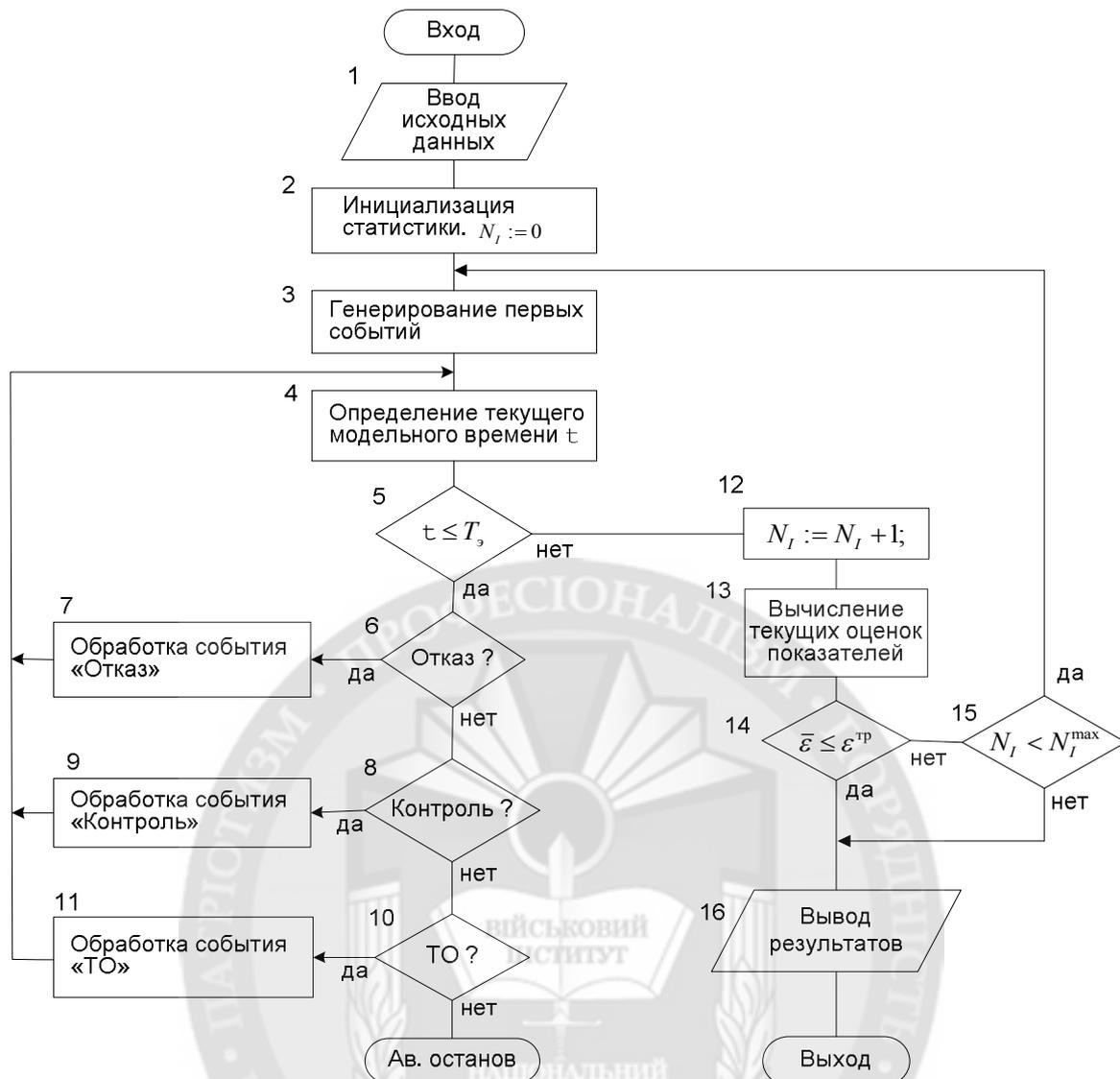


Рис. 4. Структурная схема укрупненного алгоритма процесса моделирования в ИСМ

Оператор 1 осуществляет ввод исходной информации из БД. Оператор 2 устанавливает исходные (нулевые) значения в переменных, в которых процессе моделирования будет накапливаться статистика, после завершения моделирования эта статистика будет использована для вычисления оценок ПН и СЭ. Устанавливается также исходное значение переменной N_I , в которой производится подсчет количества выполненных итераций моделирования.

Оператор 3 в начале каждой итерации моделирования генерирует значения моментов времени наступления первых событий модели, и сохраняет их в так называемом «календаре событий» (КС). КС представляет собой массив данных, в который записываются значения моментов времени всех модельных событий. В ИСМ явно имитируются три типа событий: отказы элементов, входящих в множество E_o , события «Контроль» и «ТО». На рис. 5 показана диаграмма, поясняющая последовательность наступления модельных событий. Первые события, являющиеся отказами элементов, генерируются с помощью датчика случайных чисел. Первые события «Контроль» и «ТО» планируются как детерминированные моменты времени, равные $T_{ккс}$ и $T_{то}$ соответственно.¹

¹ События «ТО» планируются только при стратегии регламентированного ТО (ТО по ресурсу)

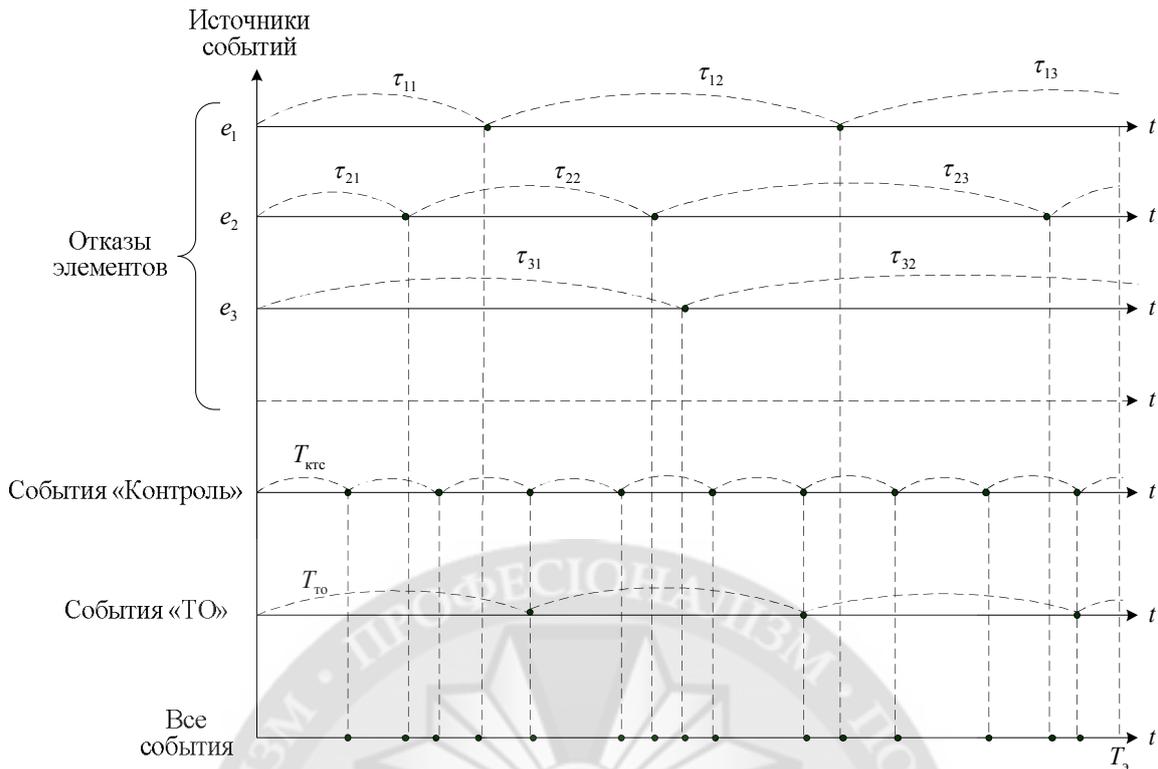


Рис. 5. Диаграмма событий модели

Затем начинается процесс моделирования, который заключается в циклическом выполнении операторов 3-11. Оператором 4 осуществляется «просмотр» КС, в результате такого просмотра определяется наименьшее содержащееся в нем значение, которое и принимается в качестве текущего модельного времени t (это время соответствует текущему событию). Если это время не превысило заданного значения продолжительности моделирования T_3 (эту проверку выполняет оператор 5), то далее выполняются операторы 6-11.

Операторы 6, 8, 10 проверяют тип наступившего события. Если текущее событие «Отказ», оператор 6 передает управление оператору 7, который осуществляет обработку этого события. Обработка события заключается в накоплении необходимой статистики, связанной с этим событием, и планировании времени следующего события. Время следующего отказа генерируется с помощью датчика случайных чисел. Для определения случайного времени (наработки) между отказами элементов $e_i \in E_0$ используется датчик случайных чисел, подчиненных DN -распределению, которое считается наиболее адекватным для описания закономерностей отказов элементов радиоэлектронной аппаратуры [4]. Полученное значение времени следующего отказа элемента e_i сохраняется в КС вместо его прежнего значения.

Обработка событий «Контроль» и «ТО» осуществляется аналогичным образом. Если текущее событие «Контроль», выполняется оператор 9, если текущее событие «ТО», выполняется оператор 11. Более подробное описание этих операторов можно найти в [2].

Рассмотренный циклический процесс исполнения операторов 4-11 будет продолжаться до тех пор, пока текущее время t не превысит заданное значение продолжительности эксплуатации объекта T_3 . Как только выполнится условие $t > T_3$, циклический процесс прерывается, и оператор 5 передает управление оператору 12. Оператор 12 подсчитывает количество выполненных итераций моделирования N_I . Оператор 13 рассчитывает текущие оценки ПН и СЭ. Операторы 14,15 проверяют условие завершения процесса моделирования.

Таким условием является достижение требуемой точности результатов ($\bar{\varepsilon} \leq \varepsilon^{TP}$) или выполнение заданного количества итераций процесса моделирования ($N_I = N_I^{\max}$). Если такое условие не выполняется, оператор 15 передает управление оператору 3, после чего процесс продолжается описанным выше образом. Завершается работа программы выполнением оператора 16, который выводит полученные результаты на экран монитора.

Программная реализация модели.

ИСМ реализована в виде комплексной программы ISMPN, разработанной средствами системы программирования Delphi [5]. Программа ISMPN интегрирована с базой данных, которая построена на основе локального сервера СУБД InterBase [6].

В программе имеется несколько режимов работы, основными из которых можно считать режимы **База данных** и **Моделирование**. На рис. 6 и 7 показан вид экрана ПК в этих режимах работы программы ISMPN.

В режиме **База данных** осуществляется ввод всей исходной информации, необходимой для работы программы. На рис. 6 показана страница, с которой вводится информация о конструктивной структуре объекта (окно в левой части экрана, в котором отображается дерево конструктивной структуры) и данные о ПН и стоимости отдельных конструктивных элементов в таблицах, расположенных справа.

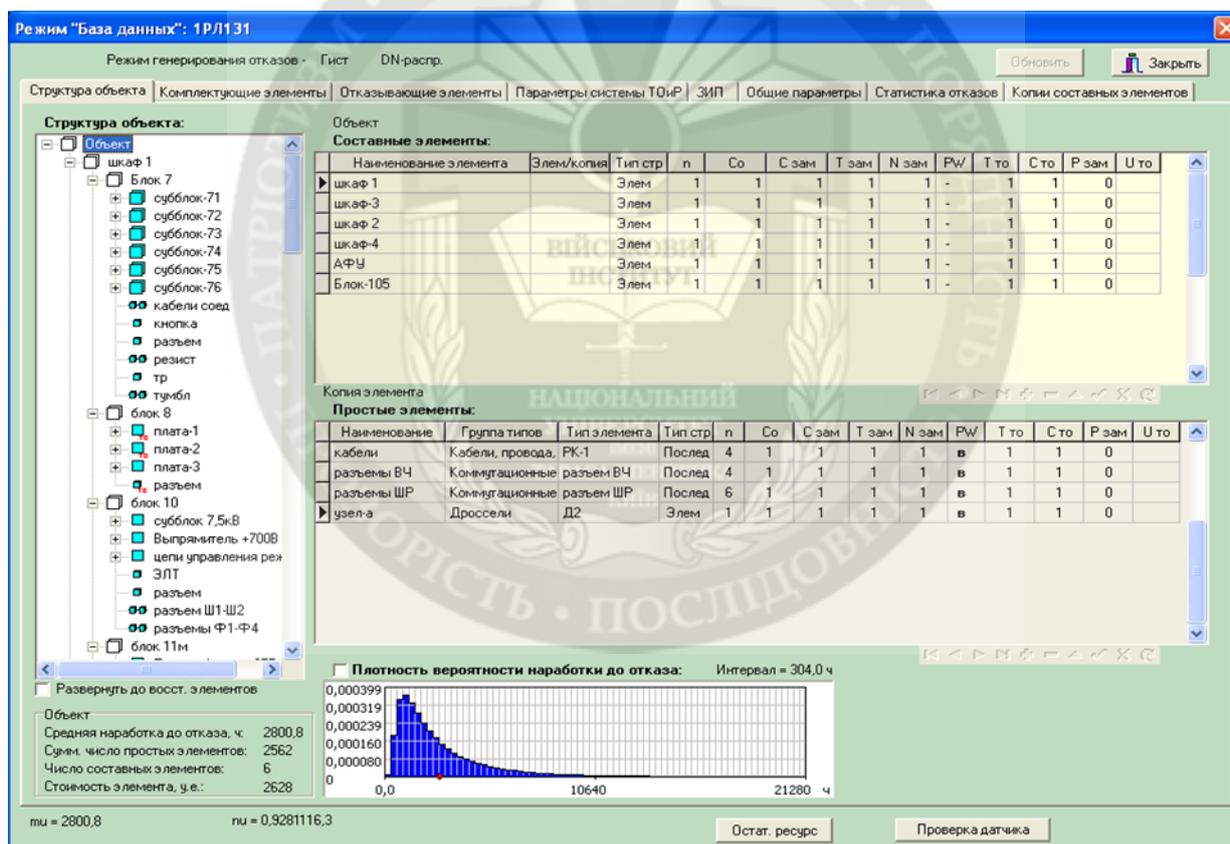


Рис. 6. Вид экрана ПК в режиме «База данных»

В верхней таблице отображаются (и редактируются) данные о составных элементах, которые входят в составной элемент, выделенный в данный момент в дереве конструктивной структуры. В нижней таблице отображаются данные, относящиеся к простым элементам (элементам нижнего уровня), входящим в состав выделенного составного элемента.

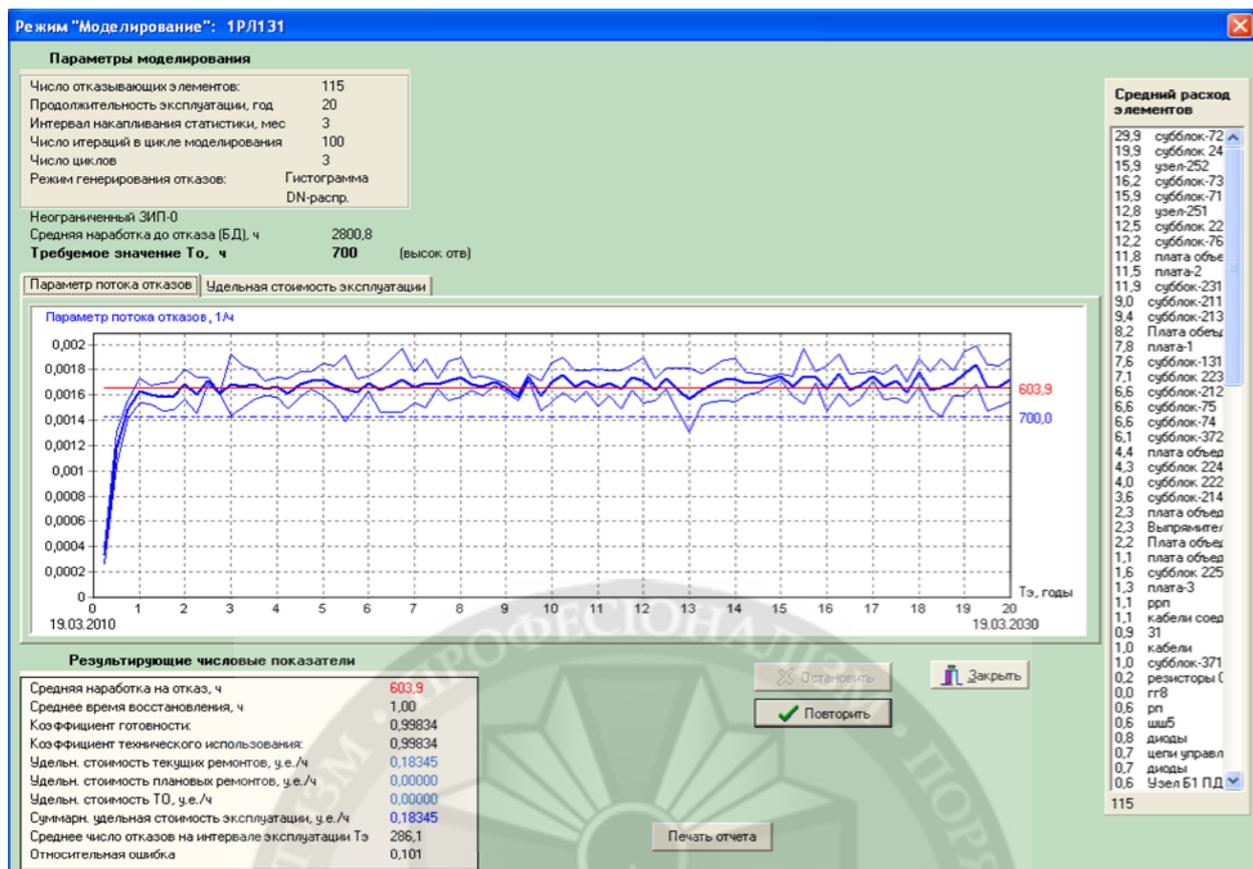


Рис. 7. Вид экрана ПК в режиме «Моделирование»

На рис. 7 показан вид экрана ПК после завершения расчетов в режиме **Моделирование**. В центральной части экрана отображается график функции $\omega(t)$ и графики доверительного интервала для доверительной вероятности 95%, внизу слева отображаются полученные в результате моделирования оценки показателей T_0 , T_B , K_r , $K_{ти}$ и c_s , величина статистической ошибки $\bar{\varepsilon}$. Слева вверху отображаются значения некоторых из наиболее важных параметров моделирования. Справа от графика $\omega(t)$ в качестве дополнительной информации отображаются значения среднего числа элементов $e_i \in E_0$, которое по прогнозу будет заменяться на протяжении рассматриваемого периода эксплуатации T_s .

Более подробные сведения о программе ISMPN можно найти в [2].

Закключение. В статье рассмотрена кратко ИСМ, с помощью которой можно прогнозировать ПН и СЭ объекта РЭТ на стадии его проектирования. Основное внимание уделено ее внешнему описанию, то есть содержанию исходной для модели информации и получаемым в результате моделирования результатам. Рассмотрены также основной алгоритм модели и принципы его работы. На основе представленной в статье информации можно получить достаточно полное представление о возможностях ИСМ и круге задач, которые могут решаться с ее применением.

В частности, должно быть понятно, что с помощью ИСМ могут решаться на этапе разработки объекта РЭТ задачи оптимального выбора наиболее важных параметров СТД и СТО, так как эти параметры представлены в исходных данных для ИСМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. – 400 с.
2. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей. Монография / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В.Банзак, В.О. Браун [и др.] : под ред. С.В.Ленкова. – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
4. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
5. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Программирование в Delphi 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 784 с.
6. Ковязин А., Востриков С. Мир InterBase. Архитектура, администрирование и разработка приложений баз данных в InterBase/Firebird/Yaffil. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2002. – 496 с.

REFERENCES:

1. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnyh sistem. M.: Nauka, 1978. – 400 s.
2. Prognozirovanie nadezhnosti slozhnyh ob#ektov radiojelektronnoj tehniky i optimizacija parametrov ih tehniczeskoj jekspluatacii s ispol'zovaniem imitacionnyh statisticheskikh modelej. Monografija / S.V. Lenkov, K.F. Borjak, G.V.Banzak, V.O. Braun [i dr.] : pod red. S.V.Lenkova. – Odessa : Izd-vo «VMV», 2014. – 256 s.
3. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij: zadachi, principy, metodologija. – M.: Nauka, 1980. – 208 s.
4. Strel'nikov V.P., Feduhin A.V. Ocenka i prognozirovanie nadezhnosti jelektronnyh jelementov i sistem. – K.: Logos, 2002. – 486 s.
5. Darahvelidze P.G., Markov E.P. Programmirovanie v Delphi 7. SPb.: BHV-Peterburg, 2004. – 784 s.
6. Kovjazin A., Vostrikov S. Mir InterBase. Arhitektura, administrirovanie i razrabotka prilozhenij baz dannyh v InterBase/Firebird/Yaffil. M.: KUDIC-OBRAZ, 2002. – 496 s.

Без рецензії.

д.т.н., проф. Ленков С.В., д.т.н., доц. Боряк К.Ф.,
к.військ.н., доц. Пашков С.О., к.т.н., доц. Цицарев В.М.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ Й ВАРТОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ ІМІТАЦІЙНОГО СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті розглядається імітаційна статистична модель (ІСМ), призначена для прогнозування показників надійності (ПН) і вартості експлуатації (ВЕ) об'єкта радіоелектронної техніки (РЕТ) з урахуванням його конструктивної структури й параметрів систем технічного діагностування (СТД) і технічного обслуговування (СТО). У якості ПН виникають оцінки стандартних показників: середній наробіток на відмову, коефіцієнт готовності й ін. Як показник ВЕ виникає питома вартість експлуатації об'єкта.

Припускається, що ІСМ повинна застосовуватися в основному на етапах розробки об'єкта РЕТ. За результатами, одержуваним за допомогою ІСМ, можна приймати обґрунтовані рішення на вибір структури й конструкції об'єкта, визначати оптимальні параметри СТД і СТО.

ІСМ реалізована програмно за допомогою засобів системи програмування Delphi. Наводяться форми представлення вхідної й вихідної інформації моделі.

Ключові слова: об'єкт радіоелектронної техніки, показники надійності, параметри об'єкта радіоелектронної техніки, імітаційне статистичне моделювання, технічне обслуговування й ремонт.

Prof. Lenkov S.V., prof. Borjak K.F., Ph.D. Pashkov S.A., Ph.D. Tsytsarev V.M.
**PREDICTING THE INDICES OF RELIABILITY AND OPERATING COST OF THE OBJECTS
OF RADIO-ELECTRONIC ENGINEERING WITH THE SIMULATION-BASED STATISTICAL
MODELING METHOD**

The article deals with a simulation-based statistical model (SBSM) proposed by the authors, which is meant for predicting the reliability indices (RI) and operating cost index (OCI) of the object of radio-electronic engineering (REE) taking into account its design structure, parameters of technical diagnostics system (TDS) and maintenance system (MS). Standard indices: average prefailure life, readiness factor, etc. were taken as RIs. Maintenance cost was taken as OC index.

It is supposed that SBSM will be used mainly at the development stages of the object of REE. According to the results obtained by means of SBSM, grounded decisions on the choice of the structure and design of the object can be made, and optimal parameters of TDS and MS can be determined. SSM is implemented in software by means of Delphi programming system tools. Representation forms of the input and output data of the model are given.

Keywords: object of radio-electronic engineering, reliability indices, parameters of object of radio-electronic engineering, simulation-based statistical modeling, maintenance and repair.