

УДК 656.13:629.33

**В.Г. Максимов**, канд. техн. наук, доц.,  
**А.Д. Ницевич**, канд. техн. наук, доц.,  
**А.А. Пономаренко**, магистр,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

*В.Г. Максимов, О.Д. Ницевич, А.А. Пономаренко.* **Надійність системи керування та оптимальне планування технічного обслуговування автомобілів.** Для прийняття ефективних рішень з оперативно-го управління виробничими процесами технічної експлуатації автомобілів необхідна достовірна інформація про технічний стан автомобілів, що перебувають в автотранспортному підприємстві. Джерелом інформації є технічний контроль та інструментальне діагностування рухомого складу.

*Ключові слова:* надійність, системи керування автомобілем, технічне обслуговування.

*В.Г. Максимов, А.Д. Ницевич, А.А. Пономаренко.* **Надёжность системы управления и оптимальное планирование технического обслуживания автомобилей.** Для принятия эффективных решений по оперативному управлению производственными процессами технической эксплуатации автомобилей необходима достоверная информация о техническом состоянии автомобилей, находящихся в автотранспортном предприятии. Источником информации является технический контроль и инструментальное диагностирование подвижного состава.

*Ключевые слова:* надежность, системы управления автомобилем, техническое обслуживание.

*V.G. Maksimov, O.D. Nitsevyich, A.A. Ponomarenko.* **Reliability of control systems and optimal planning of car maintenance.** In order to make effective decisions on the operational management of production processes of technical maintenance of vehicles, there is a need for reliable information on the technical condition of motor vehicles in the road transport enterprise. The source of the information is the technical control and instrumental diagnosis of the rolling stock.

*Keywords:* reliability, vehicle control system, maintenance.

В общем случае  $j$ -я подсистема системы управления автомобилем, состоящая из  $n$  подсистем, находится в  $m_j$  различных состояниях, которые не всегда представляется возможным свести к двум состояниям — работоспособному или отказу.

Тогда система управления автомобилем характеризуется траекторией в пространстве с числом состояний

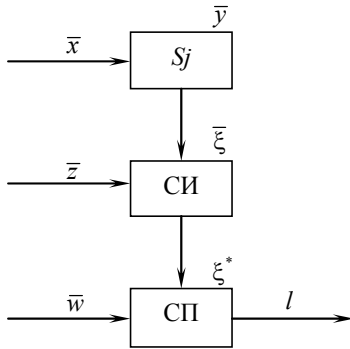
$$M = \prod_{l=1}^n m_j. \quad (1)$$

*Математические модели оптимизации надежности сложных систем.* В общем случае, техническое состояние автомобиля (объекта) зависит от нескольких векторных аргументов

$$l = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{w}). \quad (2)$$

Зависимость (2) — суть математическая модель процесса прогнозирования технического состояния автомобиля. Вероятностный характер модели определяется тем, что аргументы  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{w}$  являются случайными функциями.

Получить зависимость (2) в явной аналитической форме для такого сложного объекта, как автомобиль, практически невозможно. В той связи используют различные приемы упрощения модели и процедуры обработки.



Однолинейная схема системы прогнозирования технического состояния автомобиля

Совокупность принципов, методов и средств обнаружения и поиска дефектов в процессе эксплуатации составляет основу диагностического аспекта надежности подвижного состава.

В общем виде задача прогнозирования технического состояния  $i$ -го автомобиля в автотранспортном предприятии представлена на рисунке, где  $S_j$  —  $i$ -й автомобиль; СИ — средства измерения; СП — средства прогнозирования;  $\bar{x}$  — внешние факторы, оказывающие влияние на техническое состояние помехи;  $\xi_l, l=1, 2, \dots, n$  — измеряемые параметры автомобиля (вектор  $\bar{\xi}$ );  $\bar{z}$  — вектор погрешностей измерения;  $\bar{w}$  — вектор погрешностей прогнозирования.

Здесь, следует выделить виды обработки информации с целью определения:

$L(S_2, T_2)$  — технического состояния группы  $S_2$  автомобилей в будущий период времени  $T_2$ ;

$L(S_0, T_2)$  — технического состояния  $i$ -го автомобиля  $S_0$  в будущий период времени  $T_2$ ;

$L(S_2, T_0)$  — технического состояния группы  $S_2$  автомобилей в настоящий период времени  $T_0$ ;

$L(S_0, T_0)$  — технического состояния  $i$ -го автомобиля  $S_0$  автомобилей в настоящий период времени  $T_0$ .

Первые два вида обработки информации характеризуют задачи прогнозирования, остальные — задачи диагностирования.

В период эксплуатации подвижного состава в автотранспортном предприятии наиболее актуальным является индивидуальное прогнозирование состояния  $i$ -го автомобиля, которое позволяет осуществлять техническое обслуживание по состоянию автомобиля.

Определим периоды времени, к которым относится информация о техническом состоянии (в прошлом, настоящем и предсказываемом):

$t_0$  — настоящий момент или период времени;

$T_1$  — прошлый период времени;

$T_2$  — будущий период времени;

$S_0$  —  $i$ -й исследуемый автомобиль;

$S_1$  — группа из  $k$  автомобилей автотранспортного предприятия, подвергающихся исследованию;

$S_2$  — группа из  $m$  автомобилей, техническое состояние которых определяется по информации  $S_0$  или  $S_1$ .

Техническое состояние  $i$ -го автомобиля или группы обозначим символом  $L$ :

$L(S_1, T_1)$  — группа  $S_1$  автомобилей диагностируется многократно в течение периода времени  $T_1$ ;

$L(S_0, T_1)$  —  $i$ -й автомобиль  $S_0$  диагностируется многократно в течение периода времени  $T_1$ ;

$L(S_1, T_0)$  — группа  $S_1$  автомобилей диагностируется одномоментно в момент времени  $T_0$ ;

$L(S_0, T_0)$  —  $i$ -й автомобиль  $S_0$  диагностируется одномоментно в момент времени  $T_0$ .

Техническая диагностика и прогнозирование рассматривают следующие задачи при определении технического состояния агрегатов и систем управления автомобилем:

диагностирование — определение технического состояния в данный момент времени;

прогнозирование — определение технического состояния на некоторый, наперед заданный интервал времени;

генез — определение технического состояния в прошлом, в котором находился агрегат, система управления автомобилем в некоторый момент времени.

Решение задачи прогнозирования необходимо для организации технического обслуживания подвижного состава по состоянию в отличие от обслуживания по ресурсу.

Рассмотрим классификацию задач прогнозирования и диагностирования [1].

К задачам диагностирования следует отнести поиск неисправностей, дефектов, нарушающих эксплуатацию автомобиля; проверку работоспособности и надежности функционирования агрегатов и электронных систем управления автомобилем.

Контролепригодность обеспечивается в результате преобразования структуры проверяемого агрегата, системы, для этого используют дополнительные элементы — встроенные средства тестового диагностирования.

*Оценка надежности электронных систем управления автомобилем.* Пусть сложная система  $n$  состоит из подсистем  $j$ ,  $j \in J = \{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ . Подсистемы, входящие в структуру системы управления автомобилем, могут находиться в одном из двух состояний — работоспособном и отказе, при этом отказы подсистем в общем случае происходят независимо.

Рассмотрим сложную систему управления, в процессе функционирования которой необходимо в определенной последовательности включать отдельные подсистемы для решения поставленных задач [2].

Для каждой подсистемы задается множество законов управления

$$U_j = \{ \mathbf{u}_{jl} \}, l \in L_j = \{ 1, 2, \dots, l_j^* \}, j \in J = \{ 1, 2, \dots, n \}, \quad (3)$$

позволяющих при действии на подсистемы максимальных по величине внешних возмущений выполнить с заданным качеством поставленную перед системой задачу. Здесь индекс  $j$  характеризует вид законов управления, под которым понимается, например, самонастраивающийся закон управления по отклонению, ошибке и т.п.,  $j$  — номер подсистемы  $J$  — множество индексов подсистем.

Тогда множество возможных вариантов системы управления по видам законов управления в подсистемах задается как

$$V = \{ \nu \mid \nu = (\mathbf{u}_{1l_1}, \dots, \mathbf{u}_{jl_j}, \dots, \mathbf{u}_{ln}) , \mathbf{u}_{jl_j} \in U_j, j \in J \}, \quad (4)$$

где  $\nu$  — произвольный вариант рассматриваемой системы.

В свою очередь, каждый из видов законов управления при выбранной структурной схеме его реализации может быть создан различным набором элементов технической реализации.

Множество вариантов технической реализации системы управления определяется следующим образом:

$$V = \prod_{j \in J} V_j, \quad (5)$$

где  $V_j = U_{l \in L_j}$  — вариант реализации всех законов управления  $\mathbf{u}_{jl}$ ,  $l \in L_j$   $j$ -й подсистемы.

Представим структурную схему закона управления  $\mathbf{u}_{jl}$  в виде направленного графа, в котором вершины соответствуют типам элементов реализации, а дуги — связям между элементами.

Таким образом, каждый из путей характеризуется совокупностью вершин, через которые он проходит. Построим матрицу, в которой столбцами являются номера вершин графа, а строками номера путей. Элементами матрицы являются нули и единицы, причем нуль ставится, если вершина не входит в рассматриваемый путь, а единица, если вершина входит в рассматриваемый путь.

$$\mathbf{P}_{jl}^s \left\| \begin{array}{ccc} \tau_1 & \tau_r & \tau_{r_0} \\ \mathbf{0} & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{array} \right\|$$

По этой матрице строится множество групп последовательно соединенных элементов

$$C_{jl} = \{ c_{jl}^1, \dots, c_{jl}^x, \dots, c_{jl}^{x_0} \} (\chi_0 = \chi_{jl}),$$

где  $c_{jl}^x$  — группа последовательно соединенных вершин графа, отображающего структурную схему закона управления  $\mathbf{u}_{jl}$ , через которые одновременно проходит несколько или хотя бы один путь.

В случае, когда отказ какой-либо подсистемы приводит к выходу из строя всей системы в целом, а отказ подсистемы возникает при отказе хотя бы одного элемента, на которых реализуется эта подсистема, для обеспечения заданного требования по надежности осуществляется резервирование.

Различают три вида резервирования: поэлементное, по группам элементов и по отдельным подсистемам. Предполагается, что при резервировании динамические характеристики остаются в заданных пределах.

В свою очередь, не все варианты технической реализации видов законов управления будут входить в варианты подсистем, образующих варианты системы в целом, не нарушая выделенный для проектирования системы ресурс. Поэтому возникают различные способы оптимального резервирования при ограниченных ресурсах.

1. Пусть резервирование в подсистемах производится поэлементно путем параллельного подключения резервных элементов. Элементы  $e_{kv} E_{jk}$   $k$ -го типа могут резервироваться с кратностью резервирования  $\lambda_{jk} \in [\alpha_{jk}, \beta_{jk}]$ , где целые  $\alpha_{jk}$  и  $\beta_{jk}$  — соответственно минимальная и максимальная кратность резервирования.

Максимальная кратность резервирования элемента  $e_{kv}$   $k$ -го типа, используемого для построения вариантов  $u_{jl}$   $j$ -й подсистемы, вычисляется по формуле

$$\beta'_{jk} = \min_{i \in I} \left\{ \beta_{ik} \left[ \frac{d_{ij}^2}{g_{ij}(e_{kv})} - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $d_{ij}^2$  — допуск.

2. Пусть резервирование в подсистемах осуществляется по группам  $c_{jl}^\chi$  ( $\chi=1,2,\dots,\chi_{jl}$ ) путем параллельного подключения к ним резервной группы элементов, т.е. могут резервироваться с кратностью резервирования  $\lambda_\varphi \in [\alpha_{j\chi}, \beta_{j\chi}]$ .

Максимальная кратность резервирования группы элементов  $c_{jl}^\chi$ , которая может реализовать вариант  $j$ -й подсистемы, определяется как

$$\beta'_{jk} = \min_{i \in I} \left\{ \beta_{jk} \left[ \max \frac{d_{ij}^\chi}{g_{ij}(c_{jl}^\chi)} - 1 \right] \right\}. \quad (7)$$

3. Резервирование сложной системы осуществляется путем параллельного подключения к каждой  $j$ -й подсистеме  $\lambda_j$  резервных подсистем.

В зависимости от выбранного способа резервирования после применения процедур анализа и отсева получаем суженные множества элементов, групп элементов и вариантов законов управления и определяем верхнюю границу интервала для выбора кратности резервирования, соответственно.

Обозначим  $V'_j$ ,  $j \in J$ , — множества вариантов законов управления, которые могут быть построены с учетом оставшихся множеств элементов и границ. Если множество возможных вариантов объемно, то вводится ограничение по надежности на всю систему в целом, на основе которого определяются требования на варианты подсистем и элементов.

*Оптимальное планирование технического обслуживания автомобилей в автотранспортных предприятиях.* При проведении технического обслуживания и ремонта в период обслуживания ограничивается число бригад обслуживающего персонала, а также задаются ограничения на возможность вывода определенных автомобилей на обслуживание. Имеются ограничения на материальные ресурсы и исполнителей. Задача ТО состоит в том, чтобы определить перед на-

чалом каждого интервала планирования конкретные сроки проведения ТО автомобилей, на которых поступили заявки, с учетом длительности обслуживания и повышения технической готовности автотранспортного предприятия.

1. *Постановка задачи.*

Рассмотрим автотранспортное предприятие, состоящее из  $A_{\text{сп}}$  ( $A_{\text{сп}}$  — списочный состав автомобилей) автомобилей  $j$ ,  $j \in A = \{1, 2, \dots, n\}$ . Пусть  $T$  — период обслуживания всех автомобилей малого автотранспортного предприятия. К началу периода обслуживания поступают заявки на обслуживание автомобилей с заданной длительностью обслуживания  $\tau_j$  автомобилей  $j$ ,  $j \in A$ , и значительными  $f_{ij}$  показателя качества функционирования, что характеризует коэффициент технической готовности  $j$ -го автомобиля в  $l$ -й день периода обслуживания. Пусть  $x_{jl}$  — переменная, которая указывает на день начала обслуживания  $j$ -го автомобиля за период  $T$ ,  $x_{jl} \in x_j = \{x_{j1}, \dots, x_{j\tau}\}$ , где  $x_j$  — множество значений переменной  $x_{jl}$ .

В заявке задаются средние удельные затраты  $g_{ij}(x_{jl}), i \in l = \{1, 2, \dots, m\}$  на обслуживание  $j$ -го элемента, если обслуживание начинается в  $l$ -величине ограничивающих параметров при обслуживании всех автомобилей.

В качестве критерия качества обслуживания рассматривается показатель, выражающий минимальное отклонения сроков обслуживания автомобилей от оптимальных значений  $k_j(x_{jl}) = |f_{0j} - f_{ij}|$ , где  $f_{0j} = \max f_{ij}, j \in J$ .

При построении плана ТО необходимо учитывать условия, когда одновременное обслуживание, например в  $l$ -й день, некоторой группы автомобилей запрещено. Могут задаваться ограничения на весь период обслуживания, а также общего характера, например, максимально допустимое число автомобилей  $N_j$ , выводимых на обслуживание в  $l$ -й день.

Исходя из имеющихся ресурсов  $b_i, i \in l$ , необходимо определить оптимальный план обслуживания всех автомобилей, который минимизирует затраты на обслуживание и удовлетворяет указанным ограничениям.

Математическая модель сформулированной задачи имеет вид

$$k(x) = \sum_{j \in J} k_j(x_{jl}) \rightarrow \min. \quad (8)$$

При ограничениях на ресурсы

$$g_j(x) = \sum_{j \in J} g_{ij}(x_{jl}) \leq b_i, i \in l. \quad (9)$$

При ограничениях на число автомобилей, выводимых на обслуживание в  $l$ -й день,

$$\sum_{j \in J} \delta(x_{jl}) \leq N_l, l = 1, 2, \dots, T, \quad (10)$$

где  $\delta(x_{jl})$  — принимает значение 1, если в  $l$ -й день автомобиль  $j$  выводится на обслуживание, и 0 — в противном случае.

Ограничения (10) отражают условия недопустимости планирования одновременного ТО автомобилей, число которых превышает число бригад, специализирующихся на обслуживании данных типов автомобилей. Это происходит при разбиении всего парка подвижного состава на зоны обслуживания, в каждой из которых ограничено число бригад.

В частности, выражение (10) может задавать ограничения по выводу на обслуживание автомобилей, находящихся в разных зонах обслуживания. В задаче ТО дополнительными ограничениями являются условия прерывности обслуживания автомобиля  $j$  за период  $\tau_j$ , с запретами на ТО в выходные (праздничные) дни. В модели эти условия учитываются. Так, например, если седьмой день периода обслуживания  $T$ -выходной, ТО переменная  $x_{j7}, j \in J$  полагается

равной нулю, что исключает тем самым возможность начала обслуживания автомобиля в седьмой день.

В случае большой длительности обслуживания (например,  $\tau = 6$ ) во множестве  $x_j$  необходимо исключить те дни начала обслуживания, которые с учетом  $\tau_j$  приходятся на выходные.

#### *Заклучение.*

Проектирование сложных технических систем, таких как современные автомобили, сложных систем управления, представляет процесс принятия решений в условиях многовариантности задач проектирования, неопределенности [3].

Разработка гибких интеллектуальных систем проектирования связывается с концепцией построения технологических комплексов поддержки и развития жизненного цикла автомобиля (объекта).

При анализе задач, которые необходимо решить на этапе жизненного цикла автомобиля с учетом показателей надежности, выделяются следующие задачи:

- оптимального синтеза структуры объекта проектирования с учетом критерия надежности и ограничений по технико – экономическим характеристикам;
- оптимальной конфигурации в процессе функционирования и диагностики состояний работоспособности автомобиля;
- модели получения и обработки экспертной информации;
- разработки моделей используются при формировании множеств перспективных узлов, агрегатов, систем управления.

#### **Литература**

1. Волкович, В.Л. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович. — К.: Наук. думка, 1992. — 312 с.
2. Лукинский, В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. — Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
3. Максимов, В.Г. Загальні принципи діагностування електронних систем керування автомобіля / В.Г. Максимов. — Одеса: Наука і техніка, 2012. — 392 с.

#### **References**

1. Volkovich, V.L. Modeli i metody optimizatsii nadezhnosti slozhnykh system [The models and methods of optimization of reliability of complex systems] / V.L. Volkovich — Kiev: Sciences. Dumka, 1992. — 312 p.
2. Lukinskiy, V.S. Prognozirovanie nadezhnosti avtomobiley [Predicting the reliability of cars] / V.S. Lukinskiy, E.I. Zaitsev. — Leningrad Polytechnic, 1991. — 224 p.
3. Maksimov, V.G. Zagalni pryntsypy diagnostuvannia elektronnykh system keruvannia avtomobiliv [General principles of diagnosis of electronic control systems of cars] / V.G. Maksimov. — Odesa: Science and Technology. 2012. — 392 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Оробей В.Ф.

Поступила в редакцию 15 июля 2013 г.