

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СВАРНЫХ ТОЧЕК НА КУЗОВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Асп. Д.С. ВДОВИН

Предложено использовать стандартный генетический алгоритм для оптимального расположения сварных точек на кузовных конструкциях. Методика построена на основе распространенных типов конечно-элементных моделей кузовных конструкций и сварных точек. Приведены тестовые расчеты.

New method for finding optimal spot-welds quantity and location on automobile bodies proposed. Method based on spread types of car body and spot-weld finite element models and using standard genetic algorithm. Presented test problem solutions, that confirms genetic algorithm capability for optimal solution evaluation.

В настоящее время основной способ соединения кузовных деталей в единый кузов автомобиля — это контактная точечная сварка. Достоинством ее является то, что сборка крупногабаритных узлов кузова проводится на автоматизированной конвейерной линии с использованием роботов. Этот способ обеспечивает большую производительность, стабильное качество и относительную дешевизну сварных соединений.

При проектировании сварного точечного соединения инженер-конструктор руководствуется ГОСТ 15878-79 и выбирает равномерное расположение сварных точек вдоль шва с постоянным шагом. Часто такой подход не является оптимальным для передачи силового потока, воспринимаемого соединением. Поэтому возникает потребность в решении задачи оптимального расположения сварных точек на фланцах соединяемых деталей. Решение такой задачи позволит повысить эксплуатационные качества кузовных конструкций автомобилей за счет построения равнопрочного сварного точечного шва с заданными ресурсными характеристиками, снизить энергоемкость сборки за счет уменьшения количества используемых сварных точек, уменьшить износ сварочных электродов. Задачу оптимизации расположения сварных точек следует сформулировать как обеспечение заданных характеристик соединения и конструкции в целом при минимальном количестве используемых сварных точек. К таким характеристиками необходимо отнести, прежде всего, прочность и жесткость кузовных конструкций при заданных внешних нагрузках. В настоящее время наиболее эффективным и распространенным методом расчета кузовных конструкций колесных машин является метод конечных элементов (МКЭ). Расчет кузовных конструкций, в том числе на статическую прочность и жесткость, проводят на их конечно-элементных моделях (КЭМ), выполненных, как правило, из оболочечных конечных элементов (КЭ). Предлагаемая нами методика оптимизации полностью основана на использовании распространенных в автомобильной промышленности методов создания и расчета КЭМ кузовных конструкций колесных машин, а также методов конечно-элементного моделирования сварного точечного соединения. Таким образом, методику легко встроить в существующий процесс проектирования кузова автомобиля.

Решение задачи оптимизации расположения сварных точек проводилось с использованием генетического алгоритма. Генетическими алгоритмами (ГА) называется группа адаптивных методов, происходящих от тех же основ, что и естественная эволюция и генетика в соответствии с принципами естественного отбора и «выживания наиболее приспособленных». Особенность применения генетических алгоритмов заключается в

их нечувствительности к локальным минимумам и разрывам производных многоэкстремальных целевых функций, а также в способности находить решения при неизвестном характере целевой функции, «выбираться» из локальных минимумов и исследовать широкое пространство поиска реализации конструкций в тех задачах, для которых специализированных методов не существует [4]. Также важным свойством для поставленной задачи оптимизации является устойчивость сходимости ГА при очень большом количестве варьируемых параметров. Целочисленное кодирование удобно использовать в генетическом алгоритме для определения наличия или отсутствия сварной точки в определенном месте фланца.

Формально генетический алгоритм можно описать следующим уравнением [1]:

$$ГА = (P^0, \lambda, l, s, p, f, t); P^0 = (a^0_1, \dots, a^0_\lambda)$$

где P^0 — исходная популяция; a^0_i — решение задачи, закодированное в виде хромосомы; λ — целое число, размер популяции (одновременно рассматриваемых вариантов решения); l — целое число, длина каждой хромосомы популяции; s — оператор «естественного» отбора; p — отображение, определяющее рекомбинацию (кроссинговер, мутация) с помощью которой генерируется следующее поколение; f — функция оптимальности (приспособленности) или целевая функция; t — критерий остановки решения.

Зададим следующие соответствия между терминами генетического алгоритма и объектом оптимизации — кузовной конструкцией автомобиля, выполненной с использованием точечной сварки:

— *Хромосома*: совокупность всех возможных положений сварных точек N , заданных в конечно-элементной модели конструкции. Наличие сварной точки в конструкции в текущем положении — «1», отсутствие — «0» (битовая кодировка);

— *Особь*: вариант исполнения конструкции с некоторым набором сварных точек $0 \leq l \leq N$;

— *Популяция (поколение)* — совокупность всех одновременно рассматриваемых конструкций K с различными наборами сварных точек l_i ;

— *Функция приспособленности особи* — способность f конструкции удовлетворять заданным ограничениям с минимальным количеством используемых сварных точек (целевая функция).

Идея использования метода конечных элементов совместно с генетическим алгоритмом оптимизации для поиска оптимального расположения сварных точек на кузове заключается в том, что при создании конечно-элементной модели конструкции необходимо разместить сварные точки в каждом узле КЭ-сетки сварного шва. Чем плотнее будет КЭ-сетка, тем более точное расположение сварной точки можно будет использовать, включая и включая сварные точки в работу всей конструкции под нагрузкой. Таким образом, точность определения оптимального положения сварной точки равна размеру КЭ на шве, который в современных моделях автомобильных кузовов составляет 5...10 мм.

Необходимо отметить, что конечно-элементные модели, используемые для расчета вариантов исполнения конструкции, лежащие в области поиска объектных параметров R^n , должны быть верифицированы на этом пространстве (все генерируемые алгоритмом оптимизации модели должны давать адекватное и точное решение).

Целевую функцию или, в терминах генетического алгоритма, функцию приспособленности зададим в виде суммы всех сварных точек, присущих данному варианту исполнения конструкции кузова (особи). Способность конструкции развивать заданную статическую жесткость при текущих нагрузках сформулируем в виде ограничения к функции приспособленности

собленности. Необходимо заметить, что кроме жесткости при статическом нагружении в целевую функцию одновременно можно добавить и другие критерии оценки конструкции, например, собственные частоты, устойчивость, величину энергопоглощения при ударном деформировании (при расчете пассивной безопасности автомобиля). Ограничимся задачами статической прочности и жесткости, как наиболее простыми по демонстрации возможностей применения генетического алгоритма.

Исходную задачу поиска минимального количества сварных точек с ограничениями, наложенными на жесткость конструкции, преобразуем к задаче безусловного поиска минимума функции путем введения ограничений по жесткости в виде штрафных функций, добавляемых к функции приспособленности. Тогда целевая функция записывается в виде

$$f_n = l_n + \sum H(\delta_{\min}) + \sum H(F_{\max}) + \sum H(\Delta_j), n = 1 \dots K, j = 1 \dots m,$$

где l_n — число всех используемых сварных точек n -ой конструкции; $\sum H(\delta_{\min})$ — суммарный штраф за слишком близкое расположение соседних сварных точек (из-за шунтирования тока нельзя располагать на фланце сварные точки слишком близко друг к другу); $\sum H(F_{\max})$ — суммарный штраф за превышение максимально допустимой силы, передаваемой сварной точкой; $\sum H(\Delta_j)$ — сумма штрафных функций за снижение статической жесткости ниже заданной j в каждом расчетном случае, жесткость конструкции при этом оценивается по перемещению Δ_j контрольного узла конструкции.

Функции штрафа за слишком близкое расположение сварных точек, за превышение допустимой силы, передаваемой сварной точкой, и за снижение статической жесткости ниже заданной зададим в виде

$$H(\delta_{\min}) = NFact_{\delta} \frac{35 \text{ мм} - \delta_i}{\delta_i}; H(F_{\max}) = NFact_{F} \frac{F_{\max} - F_i}{F_{\max}}; H(\Delta_j) = NFact_{\Delta} \frac{\Delta_{j\max} - \Delta_j}{\Delta_{j\max}},$$

где N — число заданных в модели сварных точек; $i = 1 \dots l$, l — число сварных точек текущей особи; $j = 1 \dots m$, m — число рассматриваемых вариантов нагружения конструкции (расчетных случаев); $Fact_{\delta}$, $Fact_{F}$, $Fact_{\Delta}$ — факторы штрафа по минимальному расстоянию между сварными точками, по максимальной передаваемой силе и по жесткости соответственно (показывают, насколько «жестко» необходимо соблюдать заданные ограничения); 35 мм и δ_i — минимально допустимое расстояние (из-за шунтирования тока) и текущее расстояние между соседними сварными точками на фланце; F_{\max} и F_i — максимально допустимая сила и текущая сила, передаваемая сварной точкой; $\Delta_{j\max}$ и Δ_j — порог допустимого перемещения и текущее перемещение контрольного узла в j -ом расчетном случае.

Для проверки работы предложенной методики рассмотрим простую задачу. Симметричный стальной ($E = 2e11$ Па, $\mu = 0,3$) коробчатый кронштейн $172 \times 172 \times 40 \times 0,9$ мм нагружается отрывающей силой (рис. 1). Кронштейн приварен точечной сваркой к жесткому основанию по периферии (подобный способ используется для крепежа к кузову усилителей, дверных петель, бамперных буферов безопасности и других малогабаритных кронштейнов). Задача состоит в определении минимально необходимого числа сварных точек и их наилучшего расположения на фланцах для обеспечения заданной жесткости, оцениваемой по максимально допустимому перемещению в центре кронштейна (4.1 мм при заданной нагрузке) и по минимальной нагруженности сварных точек.

При решении задачи подобраны следующие параметры работы генетического алгоритма в соответствии с рекомендациями [2]: количество поколений — 35; количество особей в популяции — 40; число отсеиваемых вариантов в поколении (селекция) — 0.5; вероятность скрещивания родителей — 0.6; вероятность мутации — 0.01; величина эли-

ты — 0,01. На рис. 2 и 3 показаны результаты оптимизации расположения сварных точек. Решение задачи стремится к расположению четырех сварных точек по центру фланцев. Найденное расположение сварных точек оптимально и обеспечивает перемещение центра кронштейна в заданных пределах, а также минимальную нагруженность сварных точек.

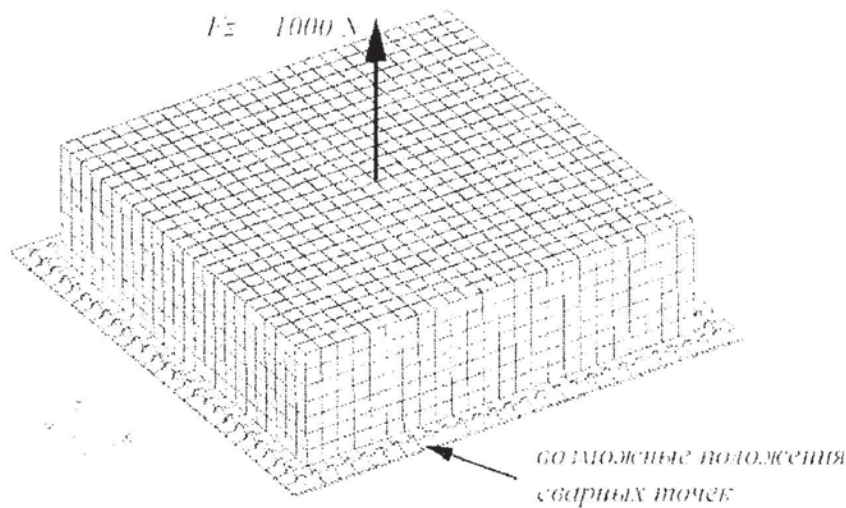


Рис. 1. Модель кронштейна с возможными положениями сварных точек и отрывающей нагрузкой

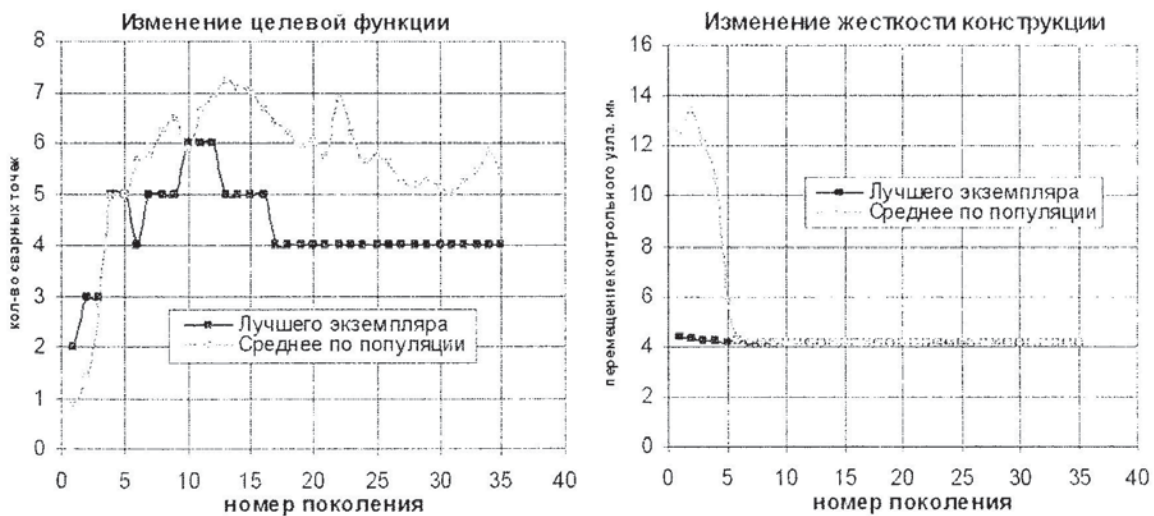


Рис. 2. Изменение количества сварных точек и перемещения в центре кронштейна в ходе эволюционных итераций

В качестве второго примера рассмотрим задачу оптимизации расположения сварных точек на прямой стальной ($E = 2e11 \text{ Па}$, $\mu = 0,3$) балке, конструктивно подобной лонжерону кузова легкового автомобиля, при ее кручении, момент $M_{кр} = 301,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Исходная модель содержит 22 сварные точки, расположенные равномерно вдоль двух фланцев, как показано на рис. 4, расчетная жесткость балки на кручение равна $179,96 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$.

Задача оптимизации – найти расположение минимально необходимого количества сварных точек вдоль фланцев, обеспечивающих жесткость балки на кручение не ниже, чем в исходной конструкции с 22-мя точками сварки. Возможные положения сварных

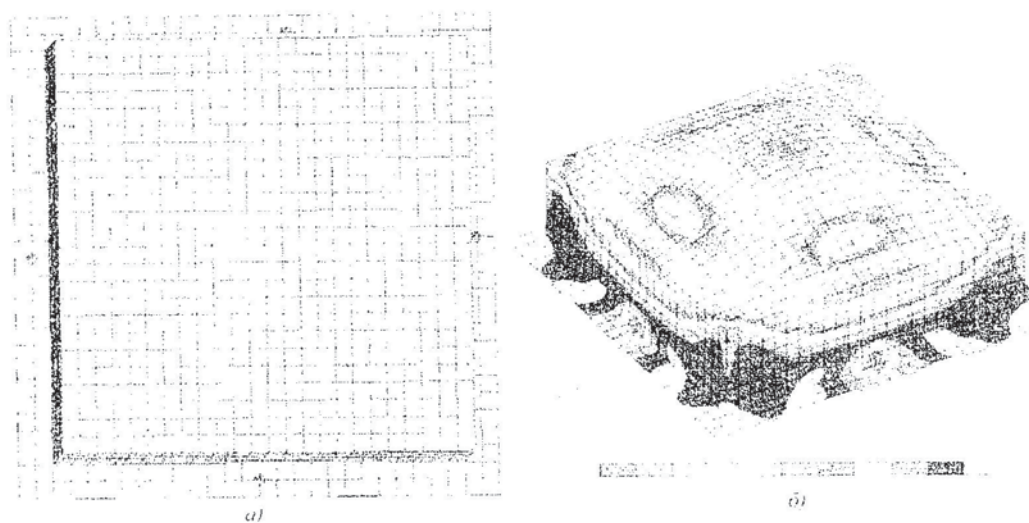


Рис. 3. *a* — найденные положения сварных точек на фланцах кронштейна; *б* — соответствующее напряженно-деформированное состояние кронштейна (деформации увеличены). Видны концентрации напряжений в точках сварки

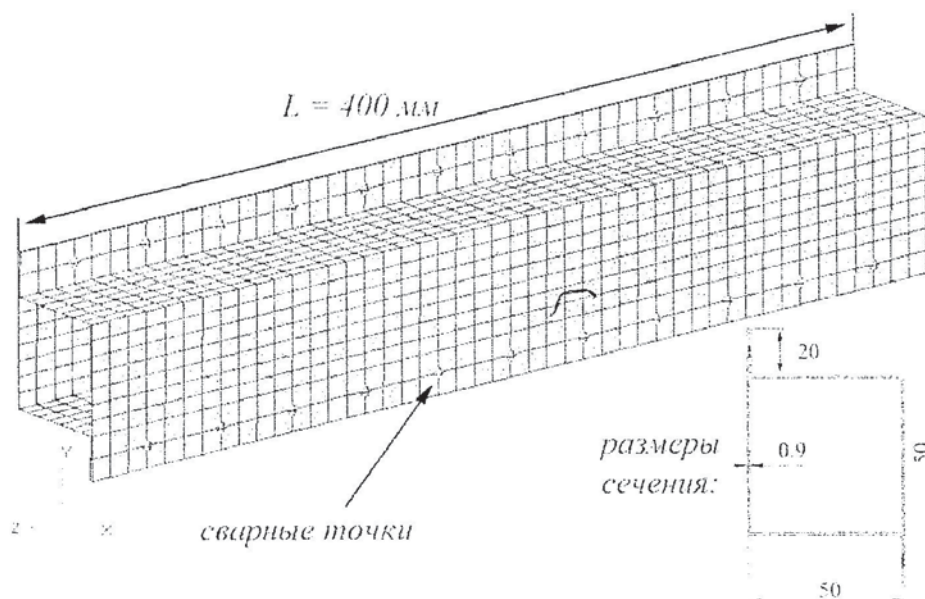


Рис.4. Стальная тонкостенная балка, конструктивно подобная лонжерону кузова, сварная из двух профилей

точек были заданы в каждом из узлов конечно-элементной сетки на фланцах. Параметры генетического алгоритма были заданы такими же, как и в описанной выше задаче с кронштейном. Крутильная жесткость балки оценивалась по линейному перемещению контрольного узла (179,96 Н · м/град соответствует 0,85 мм линейного перемещения контрольного узла на балке). Результаты оптимизации сварных точек показаны на рис. 5 и 6. По результатам работы генетического алгоритма (рис. 6, *a*) видно стремление расположить точки равномерно вдоль фланца при смещении сварных точек верхнего фланца относительно нижнего на $\sim \frac{1}{2}$ шага. Построена новая модель балки с равномерным расположением сварных точек, сдвинутых по верхнему и нижнему фланцам на $\frac{1}{2}$ шага, как показано на рис. 6, *б*. Расчетная жесткость новой балки составляет

178,52 Н · м/град, что на 0,8% ниже, чем исходная. Количество используемых точек сократилось на две.

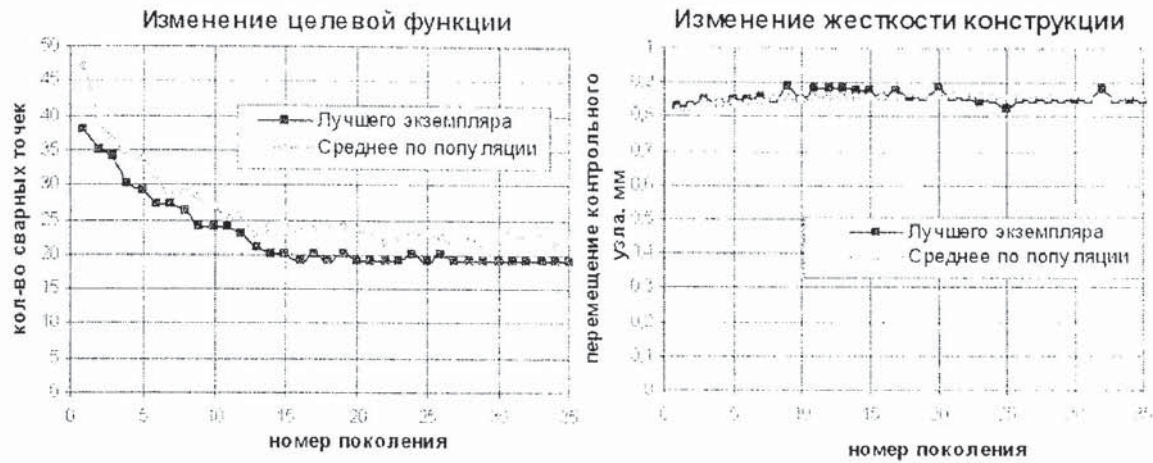


Рис. 5. Изменение количества сварных точек и перемещения контрольного узла балки

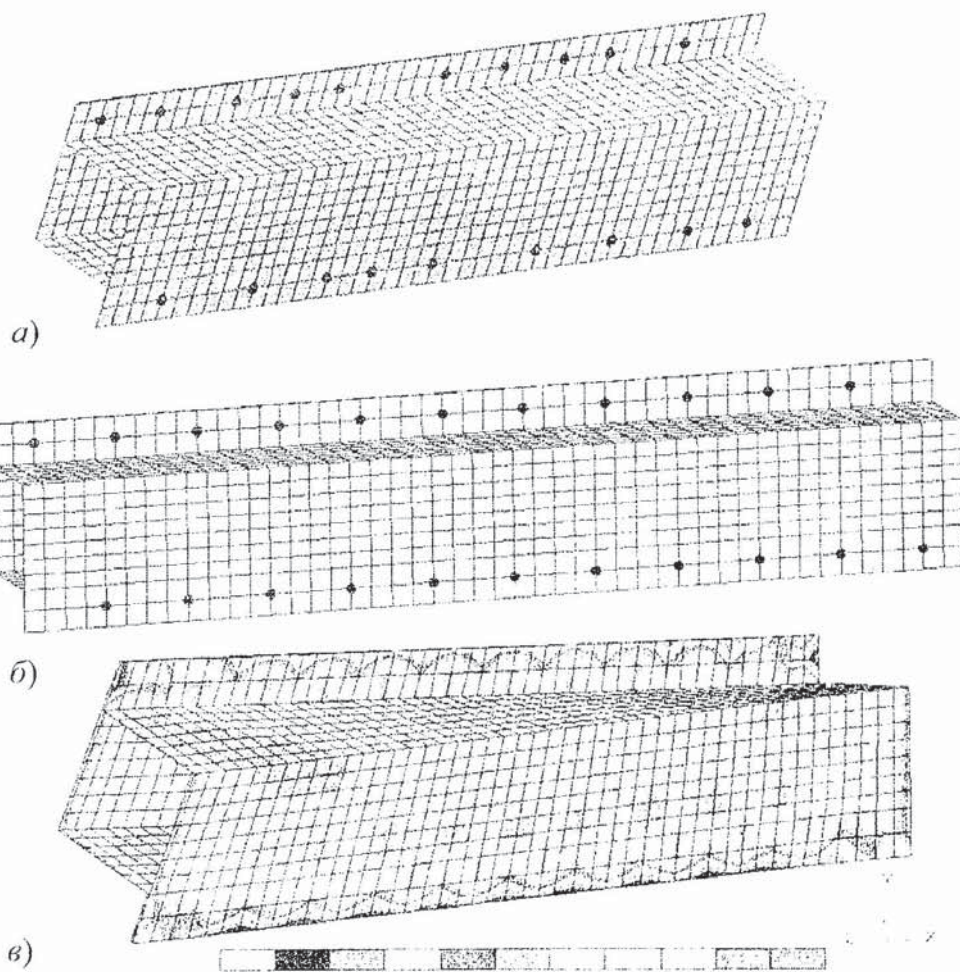


Рис. 6. *а* — результат работы генетического алгоритма; *б* — новые положения сварных точек на балке; *в* — напряженно-деформированное состояние балки с новыми сварными точками

Выводы

1. Предложена методика определения оптимального количества сварных точек и их расположения на кузовных конструкциях колесных машин, основанная на совместном использовании метода конечных элементов и генетического алгоритма.

2. Методика протестирована при расчетах, результаты которых доказали способность генетического алгоритма к нахождению оптимального решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003. — 432 с.
2. Батищев Д. И., Исаев С. А. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов. Межвузовский сб. научных тр. «Высокие технологии в технике, науке и образовании». — Воронеж: ВГТУ, 1997. — С. 4—17.
3. Карманов В. Г. Математическое программирование: Учеб. пособие. — М.: Физматлит, 2001 — 264 с.
4. Whitey D. L. Genetic Algorithms and Evolutionary Computing. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, 2002.

621.43.01

ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ МЕГАПОЛИСА

Д-р техн. наук И.Н. АРИНИН, канд. техн. наук, докторант В.Н. ПРОХОРОВ

Предложены стратегии списания городских автобусов, в частности, с использованием метода динамического программирования и уравнения Беллмана. В качестве критериев оптимальности могут быть приняты либо прибыль от эксплуатации автобусов, либо суммарные затраты на их функционирование.

Strategy of amortization of city buses, in particular, with use of dynamic programming method and Bellman equation is offered. As optimality criterions can be accepted either profit on operation of buses, or joint costs on their functioning.

В процессе эксплуатации техническое состояние автобусов изменяется: снижается их надежность, работоспособность и т.д. Эксплуатационная надежность обеспечивается планомерно-предупредительной системой технического обслуживания и ремонта [1].

Увеличение сроков службы автобусов до списания без изменения их надежности приводит к существенному ухудшению показателей эффективности парка — средней производительности, доходов, коэффициента технической готовности, потребности в рабочей силе, производственной базы, запасных частей.

В общем случае определение оптимальной стратегии списания старых автобусов представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому одной из важных экономических проблем, с которой приходится встречаться на практике, является определение оптимальной стратегии замены старых автобусов.

Различают следующие стратегии списания автобусов: по времени эксплуатации автобуса до списания — t^C ; по пробегу до списания — L^C ; по достигнутому уровню технического состояния — через минимальное значение коэффициента технического использования (K_{\min}^{III}); списание по минимуму приведенных затрат по сроку службы и пробегу — $r(t)\min$ и $r(L)\min$.