

УДК 629.424.1:629.4.028

Т.В. Селенская, Е.И. Селенский

**КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ
АВТОСЦЕПНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В СЛУЧАЙНО
СФОРМИРОВАННОМ ГРУЗОВОМ ПОЕЗДЕ**

Сформулирована задача оптимизации номинальных значений и допусков функциональных параметров автосцепных амортизаторов на этапе проектирования по критерию минимума усталостной повреждаемости несущих конструкций единиц железнодорожного подвижного состава при регламентированном уровне прочностной надежности этих конструкций и соблюдении ряда ограничений, обеспечивающих работоспособность самих амортизаторов.

Ключевые слова: автосцепные амортизаторы, качество функционирования, функциональная надежность, ресурс, несущая конструкция, функциональные параметры, допуски, усталостная повреждаемость, межремонтный срок эксплуатации, оптимизация.

В современных условиях интенсификации эксплуатационных режимов и увеличения массы грузовых поездов решение важной проблемы обеспечения прочности и ресурса наиболее нагруженных элементов железнодорожных экипажей во многом связано с необходимостью совершенствования амортизаторов (поглощающих аппаратов) автосцепного оборудования, определяющих уровень действующих на подвижной состав продольных динамических усилий. При этом возможность повышения качества таких устройств целесообразно анализировать уже на стадии проектирования – в ходе всестороннего анализа особенностей их изготовления и функционирования.

К числу определяющих показателей качества функционирования автосцепных амортизаторов относятся надежность и ресурс защищаемых конструкций экипажей. Фактические значения функциональных (геометрических и упругодиссипативных) параметров амортизаторов отклоняются от номинальных как из-за технологических причин, так и вследствие неизбежно проявляющихся в эксплуатации процессов старения рабочих элементов, а также их износа, коррозии, пластической деформации и усталости. В связи с этим представляет интерес задача оптимального выбора номинальных значений и регламентации допусков основных функциональных параметров амортизаторов на этапе аналитического проектирования с целью увеличения межремонтных сроков эксплуатации амортизаторов при заданном уровне прочностной надежности несущих конструкций единиц подвижного состава и гарантированной работоспособности самих амортизаторов. Ниже анализируются особенности решения такой задачи применительно к противоударным системам грузового поезда, случайным образом сформированного из различающихся по типу и массе вагонов с амортизаторами различных конструктивных схем и разного технического состояния.

Исследуемая динамическая система грузового поезда, составленного из локомотива массой M_0 и n вагонов массами M_j ($j = 1, 2, \dots, n$), представляется как одномерная со случайными параметрами межвагонных связей и величинами M_j . Статистические характеристики случайных параметров связей и величин M_j определяются специальной обработкой соответствующих экспериментальных данных [1]. В качестве статистических моделей процессов $h(t)$ деградационного изменения функциональных параметров амортизаторов вследствие износа, старения и коррозии рабочих элементов предлагается использовать полуслучайные модели [2] типа

$$h(t) = \alpha t, \quad (1)$$

где α – скорость процесса $h(t)$ изменения параметра, являющегося случайной величиной с математическим ожиданием m_α и средним квадратическим отклонением (стандартом) s_α .

Продольные случайные колебания поезда описываются стохастическими дифференциальными уравнениями вида

$$\frac{dU}{dt} = A(\xi) + \varphi(t); \quad U(0) = U_0, \quad (2)$$

где U – вектор фазовых координат; A – матрица, зависящая от случайного вектора ξ параметров системы; $\varphi(t)$ – вектор-функция возмущений, соответствующая определенному режиму движения (например, троганию с места и набору скорости, движению с постоянной скоростью, в том числе с наибольшей допустимой скоростью, или торможению поезда, включая экстремальное).

Вопрос о характере реализаций процесса нагружения при моделировании возмущающих воздействий в поезде решен с учетом рекомендаций [3]. Если под реализацией понимать изменение нагрузок за время разгона или торможения, то естественно рассматривать нестационарный процесс, что обычно используется в задачах определения максимальных усилий в связях [1]. Если же понятие реализации распространить на изменение нагрузок за время пробега поезда (например, в задачах исследования прочностной надежности экипажей), процесс может рассматриваться как стационарный. Это объясняется случайностью времени разгона или торможения, интервалов между ними, параметров системы, а также вероятностным характером других нагрузок. В результате происходит интенсивное перемешивание реализаций и выравнивание значений статистических характеристик процессов в различные интервалы времени пробега. Однако в период всего срока эксплуатации автосцепных амортизаторов нестационарность процессов нагружения в формируемом поезде связана с износом, старением и коррозией рабочих элементов этих амортизаторов. В этом случае возмущения в поезде на достаточно малых по сравнению со сроком эксплуатации амортизаторов интервалах времени допустимо рассматривать как квазистационарный процесс. В анализируемой схеме имитацию эксплуатационных продольных нагрузок в составе предлагается осуществлять в виде импульсного случайного процесса. При этом в качестве модели рационально воспользоваться последовательностью импульсов постоянной длительности τ_0 , которые возникают в независимые друг от друга случайные моменты времени, причем паузы между ними распределены по нормальному закону. Статистические характеристики импульсного процесса, а также функция, аппроксимирующая форму импульсов, определяются в результате обработки данных поездных испытаний. Так, для силы тяги $F_Q(t)$ форма импульса может быть описана уравнением [1]

$$F_Q(t) = Q \sum_1^4 \Delta P_i \sigma_0(t - \tau_i),$$

где Q – масса сформированного поезда (т); ΔP_i и τ_i – величины ступеней силы тяги (кН/т) и моментов переключения четырехступенчатого локомотивного контроллера (с); $\sigma_0(t - \tau_i)$ – единичная обобщенная функция.

При этом предполагается, что удельные силы тяги ΔP_i для разных поездов отличаются несущественно, а разброс их значений происходит по нормальному закону.

Сложность структуры исследуемой динамической системы и выбранной целевой функции не позволяет решить поставленную оптимизационную задачу известными мето-

дами нелинейного программирования. Предлагаемый алгоритм расчета базируется на использовании метода статистических испытаний (Монте-Карло). Укрупненная блок-схема этого алгоритма приведена на рисунке.

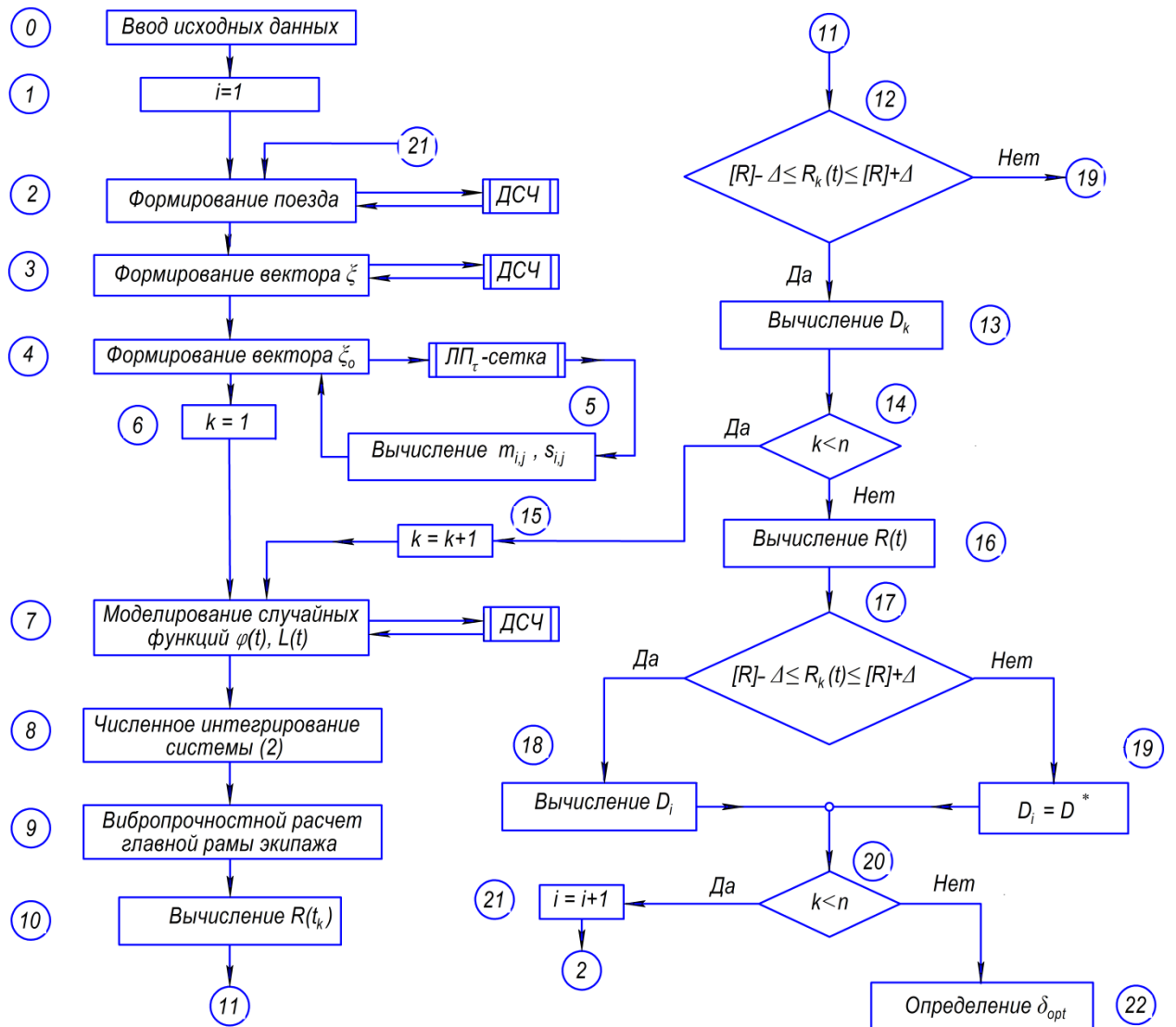


Рис. Блок-схема оптимизации номинальных значений и допусков функциональных параметров автосцепных амортизаторов

Поясним основные этапы решения рассматриваемой задачи в соответствии с предложенным алгоритмом. С помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) λ_j , равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$, моделируется совокупность случайных параметров ξ_i автосцепных амортизаторов с нормальным распределением [4]:

$$\xi_i = m_{\xi_i} + \sqrt{D_{\xi_i}} \left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_j - 6 \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) , \quad (3)$$

где m_{ξ_i} , D_{ξ_i} – соответственно математическое ожидание и дисперсия параметра ξ_i .

При формировании функциональных параметров амортизатора используется уравнение (1). Векторные случайные процессы изменения этих параметров аппроксимированы линейными векторными функциями времени с составляющими вида

$$L_i(t) = A_i + B_i t,$$

где A_i – начальное значение i -й составляющей векторной случайной функции $L_i(t)$; B_i – средняя (по времени) скорость изменения i -й составляющей этой функции; A_i, B_i – случайные величины с нормальным распределением.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (2) осуществляется с использованием модификации метода Эйлера, расширяющей область его применения на стохастические дифференциальные уравнения (метод Euler-Maruyama) [5; 6].

Специальным анализом установлено, что минимальная длительность T реализации при определении статистических параметров случайного квазистационарного процесса нагружения главной рамы экипажа может быть принята равной $T = (5 \dots 10)(T_1 + \tau_0)$, где T_1 – математическое ожидание периода повторения импульсного воздействия. На основании [1] показано, что такая длительность реализации примерно соответствует пробегу поезда в 1 км. До процедуры численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (2) на отрезке $[0, T]$ для каждого k -го режима движения поезда генерируются соответствующей длительности реализации процесса $\varphi(t)$, а также реализация (траектория) случайного процесса $L_i(t)$, хранящиеся в памяти компьютера.

Далее рассчитывается соответствующая k -му режиму движения поезда условная прочностная надежность главной рамы при значениях случайных параметров и случайных процессов динамической системы, определяемых на каждом шаге интегрирования по формуле (3) или с использованием реализаций процессов $\varphi(t)$ и $L(t)$.

В расчете надежности рамы используются частотные характеристики $W(i\omega)|_{l,r}$ для каждого силового фактора в соответствующем сечении, связывающие динамические напряжения в l -й расчетной точке рамы с силовым возмущением, действующим на r -ю массу. Эти данные устанавливаются на этапе вибропрочностного расчета рамы на единичные гармонические продольные нагрузки как статически неопределимой конструкции с дискретным расположением масс в узлах соединения стержневых элементов или в результате специального эксперимента. По известным соотношениям статистической динамики с учетом этих частотных характеристик, а также данных статистической обработки полученных в результате численного интегрирования реализаций сил, действующих на раму, определяются математические ожидания и спектральные плотности напряжений в расчетных точках от каждого внутреннего силового фактора. Затем с использованием выбранной гипотезы прочности устанавливаются статистические характеристики процесса изменения эквивалентных напряжений σ .

Надежность многократно статически неопределимой системы, состоящей из m стержней, находится по формуле [7]

$$R_y(t_k) = \prod_{i=1}^m [1 - P_{yi}(t_k)] \cong 1 - \sum_{i=1}^m P_{yi}(t_k).$$

Здесь $P_{yi}(t_k)$ – вероятность выброса случайного процесса изменения динамических напряжений в опасной точке i -го стержня за допустимый уровень σ^* для k -го режима движения поезда; уровень σ^* принят равным пределу текучести σ_T материала.

Вероятность $R_y(t_k)$ оценивается с помощью теории выбросов [7]:

$$P_{yi}(t_k) \approx 1 - \int_0^{t_k} \nu_+(\sigma^*; \tau) d\tau,$$

где $\nu_+(\sigma^*; \tau)$ – число выбросов напряжения σ за уровень σ^* в единицу времени.

Для стационарного гауссовского процесса

$$P_{yi}(t_k) = 1 - t_k \frac{s_{\dot{\sigma}}}{2\pi s_{\sigma}} \exp\left[-\frac{(\sigma_T - m_{\sigma})^2}{2s_{\sigma}^2}\right],$$

где m_{σ} , s_{σ} , $s_{\dot{\sigma}}$ – соответственно математическое ожидание и средние квадратические отклонения динамических напряжений и скорости изменения этих напряжений в опасной точке i -го стержня.

Интегрирование условной функции надежности $P_y(t_k)$ с весом, равным плотности распределения $p_k(\xi)$ значений случайных параметров ξ для k -го режима движения поезда, дает безусловную функцию надежности [2]:

$$R(t) = \int \dots \int R_y(t_k) p_k(\xi) d\xi.$$

Полученное значение $R(t)$ надежности рамы соответствует вектору ξ оптимизируемых параметров амортизаторов с конкретными значениями векторов математического ожидания m_{ξ} и среднего квадратического отклонения s_{ξ} , определяющими номинальные значения этих параметров и допуски на них, а также межремонтный срок T_p на i -м шаге поиска.

Для решения сформулированной оптимизационной задачи рекомендуется использовать ЛП-поиск [8], позволяющий осуществить дискретный обзор пространства варьируемых статистических характеристик вектора ξ_o оптимизируемых параметров амортизаторов в случайно сформированном грузовом поезде. Розыгрыш статистических характеристик параметров ξ_o осуществляется по формулам

$$m_{i,j} = m_j^* + q_{i,j}(m_j^{**} - m_j^*), \quad s_{i,j} = s_j^* + q_{i,j}(s_j^{**} - s_j^*),$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – номер текущего эксперимента; $j = 1, 2, \dots, r$ – номер координаты пространства поиска (математического ожидания m_j и среднего квадратического отклонения s_j параметра ξ_{oj}); $q_{i,j}$ – i -е числа Соболя [8] в j -й строке, образующие ЛП $_{\tau}$ -сетку ($0 < q_{i,j} < 1$); $[m_j^*; m_j^{**}]$, $[s_j^*; s_j^{**}]$ – области изменения статистических характеристик j -го оптимизируемого параметра вектора ξ_o .

Рассмотренная последовательность расчета соответствует i -му шагу поиска. Общее число N машинных экспериментов назначается таким образом, чтобы обеспечить достаточно высокую вероятность нахождения лучших решений в области, составляющей L -ю часть исходного пространства поиска [9]:

$$P = 1 - (1 - L)^N.$$

Оптимальные значения δ_{opt} статистических характеристик исследуемых функциональных параметров определяются по минимуму усталостной повреждаемости D [10]:

$$D = f \int_{\sigma_{a \min}}^{\sigma_{a \max}} \sigma_a^m p(\sigma_a) d\sigma_a .$$

Здесь f – расчетная частота процесса изменения напряжений в рассматриваемом сечении конструкции, определяемая в соответствии с принятыми допущениями о структуре этого процесса; $p(\sigma_a)$ – плотность распределения амплитуд напряжений; $\sigma_{a \min}$, $\sigma_{a \max}$ – минимальная и максимальная амплитуды повреждающих напряжений; m – показатель степени кривой усталости.

Такая форма представления показателя усталостной повреждаемости позволяет непосредственно связать этот критерий качества с долговечностью конструкции, выраженной в единицах времени, что позволяет установить межремонтный срок T_p .

При движении экипажа в различных режимах эксплуатации расчетное выражение показателя усталостной повреждаемости D принимает вид

$$D = \sum D_k p_k ,$$

где D_k , p_k – показатель усталостной повреждаемости и вероятность k -го режима эксплуатации соответственно.

Величины δ_{opt} статистических характеристик исследуемых функциональных параметров определяются в соответствии с выражением

$$g(\delta_{opt}) = \min_{\delta} [D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_N]$$

при ограничениях вида

$$[R] - \Delta \leq R_i(t) \leq [R] + \Delta , \quad (4)$$

где D_i – показатель усталостной повреждаемости, найденный на i -м шаге поиска (при нарушении ограничения по условию (4) показателю усталостной повреждаемости D_i присваивается максимально возможное значение D^* , соответствующее этому типу переменных); δ_{opt} – оптимальные статистические характеристики $m_{\xi_o}^{opt}$ и $s_{\xi_o}^{opt}$ функциональных параметров ξ_o автосцепных амортизаторов, определяющие номинальные значения этих параметров и их допуски, соответствующие оптимальному межремонтному сроку T_p ; $R_i(t)$ – надежность рамы экипажа, найденная на i -м шаге поиска; $[R]$ – нормативное значение функциональной надежности амортизаторов (прочностной надежности экипажа) [11]; $[R] \pm \Delta$ – предельные допустимые значения надежности $R(t)$ рамы.

При обработке сформированного алгоритма получено решение частной тестовой задачи анализа качества функционирования фрикционных амортизаторов удара распространенных клиновых схем (Ш-1-Тм, Ш-2-В, Ш-2-Т и др.) применительно к шестиосному грузовому тепловозу серии ТЭ-10Л с несущей рамой [12]. Установлено, что назначение оптимизированных предложенным способом номиналов и допусков функциональных параметров позволяет существенно (более чем на 20%) уменьшить издержки, связанные с восстановительными ремонтами как самих автосцепных амортизаторов, так и защищаемых с их помощью несущей конструкции локомотива и закрепленного на ней оборудования.

Разработанный алгоритм, дополненный процедурой оптимизации функциональных параметров автосцепных амортизаторов вагонов грузового парка с учетом особенностей

их ударного нагружения на сортировочных горках, может быть положен в основу создания подсистем САПР единиц грузового подвижного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин, Е.П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
2. Тимашев, С.А. Надежность больших механических систем / С.А. Тимашев. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
3. Брауде, В.И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин / В.И. Брауде. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.
4. Кретов, М.В. О компьютерном моделировании случайных величин / М.В. Кретов // Вестн. КГУ. Сер. Информатика и телекоммуникации. – 2005. – Вып. 1-2. – С.77-83.
5. Кузнецов, Д.Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения / Д.Ф. Кузнецов. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 816 с.
6. Schafter, T. Numerical Integration of SDEs: A Short Tutorial/ T. Schafter; Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL). – Switzerland, 2010. – http://infoscience.epfl.ch/record/143450/files/sde_tutorial.pdf.
7. Ржаницын, А.Р. Некоторые вопросы надежности стержневых конструкций / А.Р. Ржаницын // Исследования по теоретическим основам строительных конструкций. – Л.: ЛИСИ, 1983. – С. 5-15.
8. Соболев, И.М. ЛП-поиск и задачи оптимального конструирования / И.М. Соболев, Р.Б. Статников // Проблемы случайного поиска. – Рига: Зинатне, 1972. – №1. – С. 117-135.
9. Сергеев, В.И. К вопросу об объеме машинных экспериментов на ЭВМ в методе «ЛП-поиск» / В.И. Сергеев, Р.Б. Статников, И.Т. Чернявский // Решение задач прикладной механики на ЭВМ. – М.: Наука, 1978. – С. 9-14.
10. Никольский, Л.Н. Влияние изменения фрикционных свойств пар трения от относительной скорости скольжения на работоспособность гасителей колебаний по показателю усталостной повреждаемости конструкции/Л.Н. Никольский, Т.В. Селенская//Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные рукописи» №2(112). – М.: ЦНИИТЭИТяжМаш, 1981. – 15с.
11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
12. Селенская, Т.В. Оптимизация функциональных параметров автосцепных амортизаторов локомотива, работающего в случайно сформированном грузовом поезде / Т.В. Селенская, Е.И. Селенский // Производственный опыт и научно-технические достижения в тяжелом машиностроении. Информационный сборник. – М.: ЦНИИТЭИТяжМаш, 1990. – Сер. 9. – Вып. 21. – С. 36-38.

Материал поступил в редколлегию 10.04.14.