

означает, что есть точки, в которых функция имеет экстремум (рис.1). Если число экстремальных точек велико, то можно считать, что экстремумы $T(\tau)$ имеют непрерывное распределение с плотностью $f(t)$. Тогда и существует функция распределения $F(t)$, равная вероятности того, что экстремальное значение $T(\tau)$ будет меньше заданного температурного значения t .

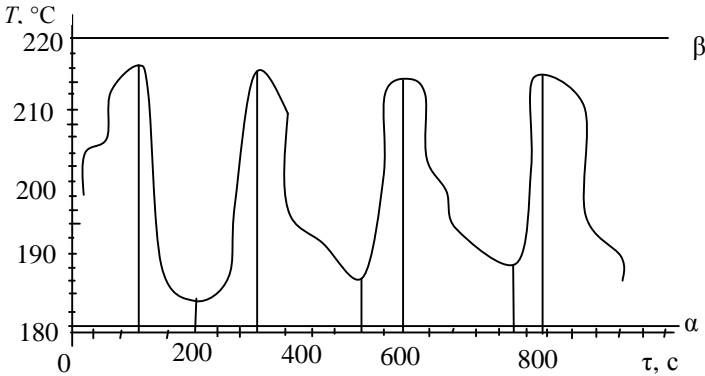


Рис.1 Пример изменения температуры нагреваемого изделия во времени

Теория, изучающая экстремальные значения случайных величин, является разделом порядковых статистик. Рассмотрим необходимые для исследования определения и понятия из теории порядковых статистик. Если случайные величины T_1, T_2, \dots, T_n расположены в порядке возрастания их значений - $T_{(1)} \leq T_{(2)} \leq \dots \leq T_{(n)}$, то $T_{(i)}$ называется i -й порядковой статистикой ($i=1, 2, \dots, n$). Обычно, хотя и не всегда, T_i статистически независимы и одинаково распределены; величины же $T_{(i)}$ зависимы из-за неравенств между ними. Когда имеется T_1, T_2, \dots, T_n - n независимых случайных величин с общей функцией распределения $F(t)$, то функция распределения наибольшей порядковой статистики $T_{(n)}$ определяется формулой

$$F_n(t) = P\{T_{(n)} \leq t\} = F^n(t), \quad (1)$$

а функция распределения наименьшей $T_{(1)}$ – формулой

$$F_1(t) = P\{T_{(1)} \leq t\} = 1 - P\{T_{(1)} > t\} = 1 - [1 - F(t)]^n. \quad (2)$$

Эти формулы – важные частные случаи общей функции распределения r -ой порядковой статистики

$$F_r(t) = P\{T_{(r)} \leq t\} = \sum_{i=r}^n C_n^i F^i(t) [1 - F(t)]^{n-i}. \quad (3)$$

Вероятность того, что при n независимых экстремумах максимум функции $T(\tau)$ не превысит заданного значения t на основании формулы (1), будет равна $F^n(t)$. А вероятность того, что при n независимых экстремумах минимум функции $T(\tau)$ будет меньше t на основании (2), определяется выражением $1 - [1 - F(t)]^n$.

Плотности распределений $f_n(t)$ и $f_1(t)$ наибольшего и наименьшего значений функции $T(\tau)$, можно получить из формул (1), (2). Они равны

$$f_n(t) = nF^{n-1}(t) f(t) \text{ и } f_1(t) = n[1 - F(t)]^{n-1} f(t). \quad (4)$$

Совместная плотность распределения случайных величин $T_{(r)}$ и $T_{(s)}$ ($1 \leq r < s \leq n$) определяется выражением [4]

$$\begin{aligned} \varphi(t_r, t_s) = & \frac{n!}{(r-1)!(s-r-1)!(n-s)!} F^{r-1}(t_r) f(t_r) \times \\ & \times [F(t_s) - F(t_r)]^{s-r-1} f(t_s) [1 - F(t_s)]^{n-s}. \end{aligned} \quad (5)$$

Совместная плотность распределения $\varphi(t_1, t_n)$ наименьшего и наибольшего значений t_1 и t_n может быть получена из формулы (5) или из условия, что эти два значения существуют, а что остальные $(n-2)$ значения расположены между ними. Это повторяется каждый раз при всех возможных перестановках из n значений экстремумов. Имеем

$$\varphi(t_1, t_n) = n(n-1) f(t_1) f(t_n) [F(t_n) - F(t_1)]^{n-2}. \quad (6)$$

Индукционная нагревательная установка не имеет отказа по температуре нагрева изделия, если размах W (разность между максимумами и минимумами функции $T(\tau)$) укладывается в пределы допуска при любом i

$$\omega_i = (t_{(n)} - t_{(1)})_i < \beta - \alpha, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (7)$$

Так как якобиан преобразования (7) равен по модулю единице, то плотность распределения $h_n(\omega)$ размаха выборки объема n можно получить по формуле (6) с помощью преобразования $t_{(n)} = t_{(1)} + \omega$:

$$h_n(\omega) = n(n-1) \int_0^{\infty} [F(t+\omega) - F(t)]^{n-2} f(t+\omega) f(t) dt, \quad (8)$$

где $0 \leq \omega < \infty$.

Функция распределения размаха $H(\omega)$ получается интегрированием выражения (8) по ω . Упрощение $H(\omega)$ происходит за счет изменения порядка интегрирования и вычисления внутреннего интеграла. В результате можно получить выражение

$$H_n(\omega) = n \int_0^{\infty} [F(t+\omega) - F(t)]^{n-1} f(t) dt. \quad (9)$$

Отсюда вероятность безотказной работы индукционной установки по температурному параметру к моменту достижения n -го экстремума в $T(\tau)$ может быть вычислена как вероятность попадания некоторого случайного отрезка ω , распределенного по закону (9), в заданный интервал (α, β) :

$$P_n(\alpha \leq \omega \leq \beta) = H_n(\beta) - H_n(\alpha). \quad (10)$$

Если распределение экстремумов подчинено равномерному закону с параметрами a и b , причем $(b - a) > (\beta - \alpha)$ (то есть возможен отказ по температурному параметру), то плотность распределения $f(t)$ и функция распределения имеют вид

$$f(t) = \begin{cases} 1/(b-a), & a < t < b, \\ 0, & t \notin [a, b]; \end{cases} \quad (11)$$

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq a, \\ (t-a)/(b-a), & a < t < b, \\ 1, & t \geq b. \end{cases} \quad (12)$$

Используя формулы (8), (11) и (12), найдем функцию плотности размаха $h_n(\omega)$ для равномерного распределения:

$$h_n(\omega) = n \cdot (n-1) \int_a^{b-\omega} \frac{1}{b-a} \left[\frac{t+\omega-a}{b-a} - \frac{t-a}{b-a} \right]^{n-2} \frac{1}{b-a} dt, \quad (13)$$

где $0 \leq \omega \leq b-a$.

Верхний предел взят потому, что $f(t+\omega) = 0$ при $t \geq b-\omega$. Отсюда

$$h_n(\omega) = \frac{n \cdot (n-1) \omega^{n-2} \cdot (b-a-\omega)}{(b-a)^n}. \quad (14)$$

Функция распределения размаха для данного закона распределения имеет вид

$$\begin{aligned}
 H_n(\omega) &= \int_0^{\omega} h_n(\omega) d\omega = \frac{n \cdot (n-1)}{(b-a)^n} \int_0^{\omega} \omega^{n-2} (b-a-\omega) d\omega = \\
 &= \frac{\omega^{n-1}}{(b-a)^n} [n(b-a) - (n-1)\omega].
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Далее, применяя формулу (10), находим вероятность безотказной работы индукционной нагревательной установки по заданному интервалу (α, β) изменения температуры нагреваемого изделия для равномерного закона распределения экстремумов

$$P_n(\alpha \leq \omega \leq \beta) = \frac{\beta^{n-1} [n(b-a) - (n-1)\beta] - \alpha^{n-1} [n(b-a) - (n-1)\alpha]}{(b-a)^n}.
 \tag{16}$$

Вероятность безотказной работы индукционной нагревательной установки по заданным α и β , если распределение экстремумов подчинено экспоненциальному закону с параметром λ , находятся следующим образом. Поскольку

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t) \quad \text{и} \quad F(t) = 1 - \exp(-\lambda t),
 \tag{17}$$

то простой подстановкой в (9) этих выражений (17) получаем функцию распределения размаха для экспоненциального закона

$$\begin{aligned}
 H_n(\omega) &= n \int_0^{\infty} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(t+\omega)} \right)^{n-1} \lambda e^{-\lambda t} dt = \\
 &= - \left(1 - e^{-\lambda \omega} \right)^{n-1} \int_0^{\infty} e^{-\lambda n t} d(-\lambda n t) = \left(1 - e^{-\lambda \omega} \right)^{n-1},
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где $0 \leq \omega < \infty$.

Подставляя (18) в формулу (10), получаем вероятность безотказной работы индукционной нагревательной установки по заданному интервалу (α, β) изменения температуры нагреваемого изделия для экспоненциального закона распределения экстремумов

$$P_n(\alpha \leq \omega \leq \beta) = \left(1 - e^{-\lambda \beta} \right)^{n-1} - \left(1 - e^{-\lambda \alpha} \right)^{n-1}.
 \tag{19}$$

Остается открытым вопрос получения оценок параметров a , b и λ . Данные оценки могут быть получены по одной реализации функции $T(\tau)$ на участке некоторого периода нормальной эксплуатации установки.

Для равномерного закона распределения наилучшей оценкой теоретического размаха $b - a$ является оценка вида [4]

$$(b - a)^* = \frac{n + 1}{n - 1} \left[t_{(n)} - t_{(1)} \right], \quad (20)$$

где $t_{(n)}$ и $t_{(1)}$ – наибольшая и наименьшая наблюдаемые температуры.

Подставляя (20) в (16), находим оценку безотказной работы индукционной нагревательной установки по результатам наблюдений, если распределение экстремумов подчинено равномерному закону

$$P_n(\alpha \leq \omega \leq \beta) \approx (\beta^{n-1} \left(\frac{n \cdot (n+1)}{n-1} (t_{(n)} - t_{(1)}) - (n-1) \beta \right) - \alpha^{n-1} \left(\frac{n \cdot (n+1)}{n-1} (t_{(n)} - t_{(1)}) - (n-1) \alpha \right)) / (t_{(n)} - t_{(1)})^n \left(\frac{n+1}{n-1} \right)^n. \quad (21)$$

Для экспоненциального закона (17) наилучшей оценкой параметра λ является оценка вида [5]

$$\lambda^* = \left(\frac{1}{n} \sum_i t_{(i)} \right)^{-1}, \quad (22)$$

где $t_{(i)}$ – наблюдаемое экстремальное значение температуры.

Тогда, подставляя (22) в (19), находим оценку безотказной работы индукционной нагревательной установки по результатам наблюдений, если распределение экстремумов подчинено экспоненциальному закону:

$$P_n(\alpha \leq \omega \leq \beta) \approx \left(1 - \exp \left(- \frac{\beta \cdot n}{\sum_i t_{(i)}} \right) \right)^{n-1} - \left(1 - \exp \left(- \frac{\alpha \cdot n}{\sum_i t_{(i)}} \right) \right)^{n-1}. \quad (23)$$

Возникает вопрос, к какому из распределений (11) или (17) ближе распределение экстремальных температурных значений. Для этого необходимо провести исследование поведения оценок вероятностей (21) и (23) при различных заданных интервальных значениях α и β температур, а также при фиксированных $t_{(n)}$ и $t_{(1)}$, считая, что n есть непрерывная величина, а оценкой

параметра λ есть величина $(t_{(n)} + t_{(1)})/2$.

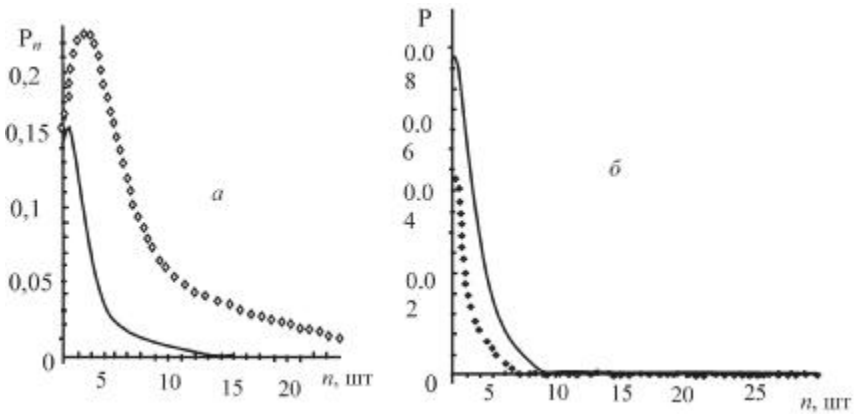


Рис.2 Вероятность безотказной работы индуктора по температурному параметру от числа циклов нагрева

На рис.2 точками указана вероятность безотказной работы индуктора по температурному параметру T при различном числе экстремумов n для распределения экстремумов по равномерному закону, а сплошной линией – для экспоненциального закона.

Анализ полученных уравнений показал, что возможны соотношения, когда, приняв равномерный закон, можно получить завышение (рис. 2а)), занижение (рис. 2б)) и как занижение, так и завышение значения вероятностной P_n безотказной работы индуктора. Предпочтение следует отдать оценке (21), так как вероятность безотказной работы принимает значения как больше, так и меньше, чем оценка (23).

Заметим, что проделанного анализа все-таки недостаточно. Ответ с высокой степенью достоверности, как всегда, может дать только массовый эксперимент по нахождению распределения экстремальных значений температур нагрева.

Получены эмпирические оценки безотказной работы индукционной установки по температурному показателю качества нагрева изделия в циклическом режиме. Предложенный метод оценки применим для оценки вероятности выхода за допустимые границы любого показателя качества, и что более универсальной оценкой безотказной работы технологической системы является оценка на основе равномерного закона распределения экстремальных значений показателей. Полученные результаты позволяют по небольшому числу экспериментальных данных произвести расчет вероятности безотказной работы индукционной установки на каждом цикле нагрева изделия.

Список литературы: 1. *Резниченко Н.К., Созонов Ю.И.* Надежность многовитковых индукторов. // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – № 39. – 2005. – С.22-2. 2. *Созонов Ю.И., Куцын А.Н.* Модель надежности изоляции электрических систем при ресурсах, меньших среднего. // Технология приборостроения. –2000. – № 1. – С.49-50. 3. *Дейвид Г.* Порядковые статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 336 с. 4. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королук, Н.Н. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин.* – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 640 с. 5. *Сазонов Ю.И., Куцын А.Н.* Оценка ресурса индукционного нагревателя для критических технологий // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків. – 1999. – С.564-568

Поступила в редколлегию 20.04.06

УДК 629.4.015:625.032.4:539.3

Е.А. ОРЛОВ, ОАО „Измюский вагоноремонтный завод”

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА РАМЫ ТЕПЛОВЗОВ: МЕТОДЫ, МОДЕЛИ, СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ САПР

Запропоновано новий метод дослідження впливу експлуатаційних факторів на напружено-деформований стан рам тепловозів. Він полягає у розкладанні навантаження на суму базових силових факторів. Сумарний напружено-деформований стан є суперпозицією напружено-деформованих станів від дії окремих силових факторів. Створено основи спеціалізованої системи комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану рам тепловозів серій 2TE10, 2TE116.

The new method of research of influencing of operating factors on the stressed-deformed state of diesel engines frames is offered. It consists in decomposition of loading to the amount of base power factors. The total stressed-deformed state is superposition of the stressed-deformed states from the action of separate power factors. The specialized system of computer design of the stressed-deformed state of frames of diesel engines of 2TE10, 2TE116 series is created.

Состояние вопроса. Современный парк локомотивов в Украине и странах СНГ характеризуется большим удельным весом тепловозов, выпущенных десятки лет назад и находящихся на пределе своего ресурса. В первую очередь это относится к рамам тепловозов, воспринимающим значительные нагрузки в процессе эксплуатации. Соответственно возникает вопрос о продлении ресурса локомотивов, а это требует оценки напряженно-деформированного состояния силовых рам. Проведенные в свое время исследования этих рам в процессе проектирования и освоения производства были ориентированы на обеспечение паспортного ресурса локомотива. В то же время сейчас большое значение приобретает вопрос возможности продления назначенного ресурса путем проведения ремонтных и восстановительных работ. Соответственно, возникает актуальная и важная

задача создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) как базовых конструкций рам локомотивов, так и их конструктивных изменений.

В литературе [1-7] освещены некоторые аспекты решения данного типа задач применительно к некоторым элементам локомотивов и вагонов. Однако представляет интерес задача параметрического анализа и синтеза изменений в существующие конструкции. А это требует разработки других подходов к моделированию напряженно-деформированного состояния рам локомотивов. От них требуется: возможность оперативного изменения структуры и параметров исследуемых рам; обеспечение возможности встраивания в системы автоматизированного проектирования; сопрягаемость с другими системами инженерного анализа, т.е. возможность двунаправленного обмена информацией с ними, например, с системой моделирования динамики железнодорожных экипажей.

Таким образом, сформулированная выше задача не имеет достаточно полного решения в литературе, а перечисленные требования принуждают использовать для ее решения новые подходы, методы, алгоритмы и соответствующее программное обеспечение. В статье предложено решение этой задачи на примере рам тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116.

Геометрические модели рам тепловозов и эксплуатационные нагрузки. Рассмотрим особенности конструкции рам тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116 [8, 9] (рис.1). Основным элементом, замыкающим на себе силовые потоки как извне, так и внутри тепловоза, является рама (рис.2).

Основные элементы рамы – две хребтовых балки, соединенные поперечинами и настилами (см. рис.2). Рама опирается на 2 тележки при помощи 4-х резинометаллических опор (рис.3).

Основные нагрузки передаются на раму от динамического воздействия 8-ми опор и от шкворневого узла (см. рис.2, 3). Кроме того, на раму действуют статические и динамические усилия от всего подрессоренного строения тепловоза (двигатель, генератор и т.д.).

В свою очередь по характеру распределения во времени возмущения на экипажную часть делятся на случайную и периодическую составляющие [10]. Анализ работы рам и кузовов и их повреждений позволил определить расчетные режимы, учитывающие наиболее неблагоприятные сочетания внешних нагрузок и определяющие прочность конструкции [1]. К ним относятся:

- а) вертикальные статические нагрузки от веса оборудования, полного запаса топлива, воды, песка, собственного веса конструкции;
- б) наибольшие тяговые усилия при режиме двойной тяги;
- в) тяговые усилия при режиме двойной тяги;
- г) растяжение-сжатие продольными усилиями;
- д) кососимметричная вертикальная нагрузка, вызванная неравномерным распределением давлений по опорам, отклоняющимся от номинального до 30%;
- е) вертикальная динамическая нагрузка, определяемая по вертикальной

статической нагрузке с учетом коэффициента вертикальной динамики k_d , принимаемого постоянным для всех сечений кузова и рамы,

$$k_d = 0,1 + 0,2 \frac{v}{f_{ст}},$$

где v – конструкционная скорость, км/ч; $f_{ст}$ – общий статический прогиб рессорного подвешивания локомотива, мм;

ж) нагрузки, имитирующие соударение и состоящие из продольных нагрузок по автосцепкам, дополненных усилиями, приложенными к шкворням рамы и равными утроенному весу тележек;

з) нагрузки, действующие при технологической подъемке кузова с размещенным в нем оборудованием;

и) нагрузки, возникающие при аварийной подъемке кузова с тележкой за буферный брус.

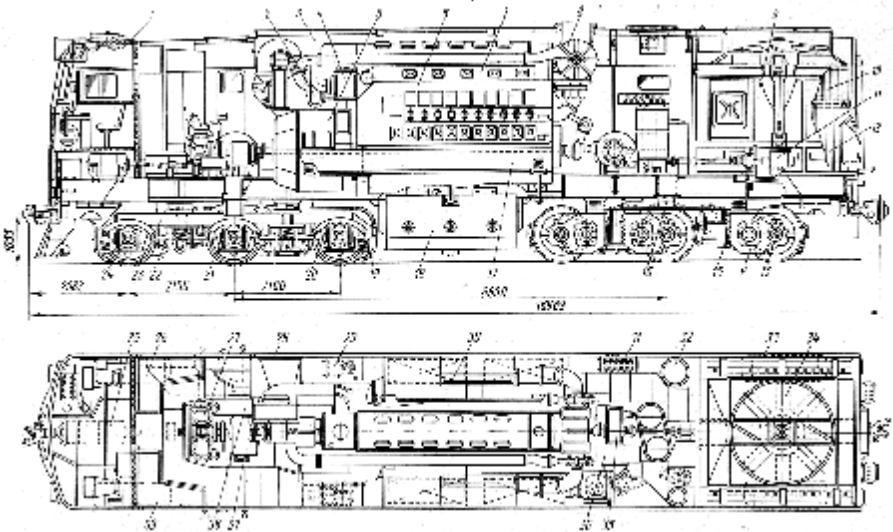


Рис.1. Тепловоз 2ТЭ10Л:

1 – кабина машиниста; 2 – центробежный нагнетатель; 3 – кузов; 4 – воздухоохладитель; 5 – главный генератор; 6 – дизель; 7 – ресивер; 8 – турбовоздуходувка; 9 – шахта холодильника; 10 – масляные секции; 11 – угловой редуктор; 12 – водяные секции; 13 – ось колесной пары; 14 – тяговый электродвигатель; 15 – пружинная подвеска; 16 – шкворень; 17 – рама дизеля; 18 – топливный бак; 19 – пружины; 20 – балансиры; 21 – направляющие рамы тележки; 22 – рессоры; 23 – рама тележки; 24 – букса; 25 – двухмашинный агрегат; 26, 39 – высоковольтные камеры; 27 – компрессор; 28 – воздушный фильтр генератора; 29 – маслопрокачивающий агрегат; 30 – воздушный фильтр дизеля; 31, 32 – фильтр

очистки масла; 33 – главные резервуары; 34 – вентиляционное колесо; 35, 37 – распределительные редукторы; 36, 38 – вентиляторы тяговых электродвигателей

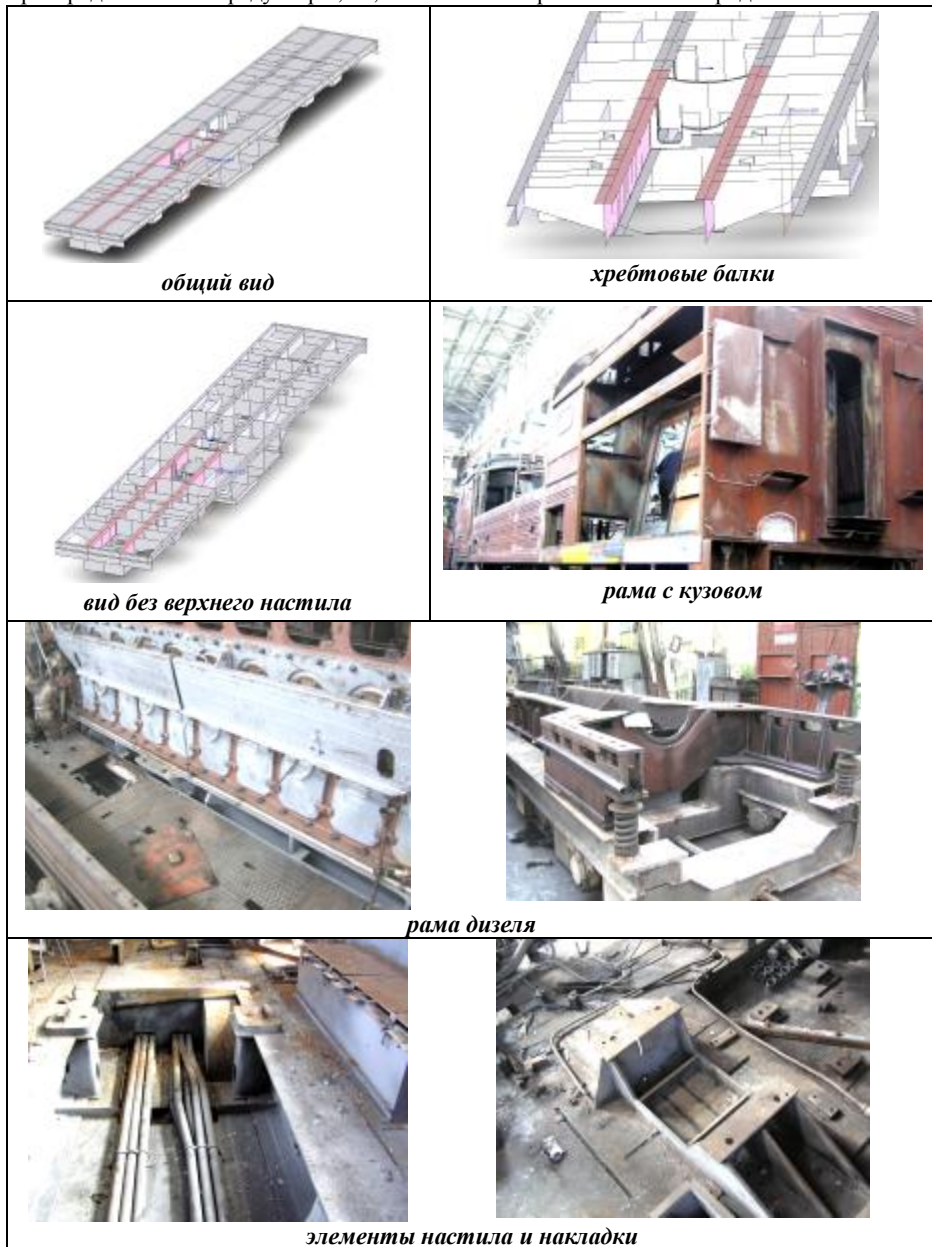


Рис.2. Геометрическая модель рамы тепловоза 2ТЭ116 и ее фрагменты

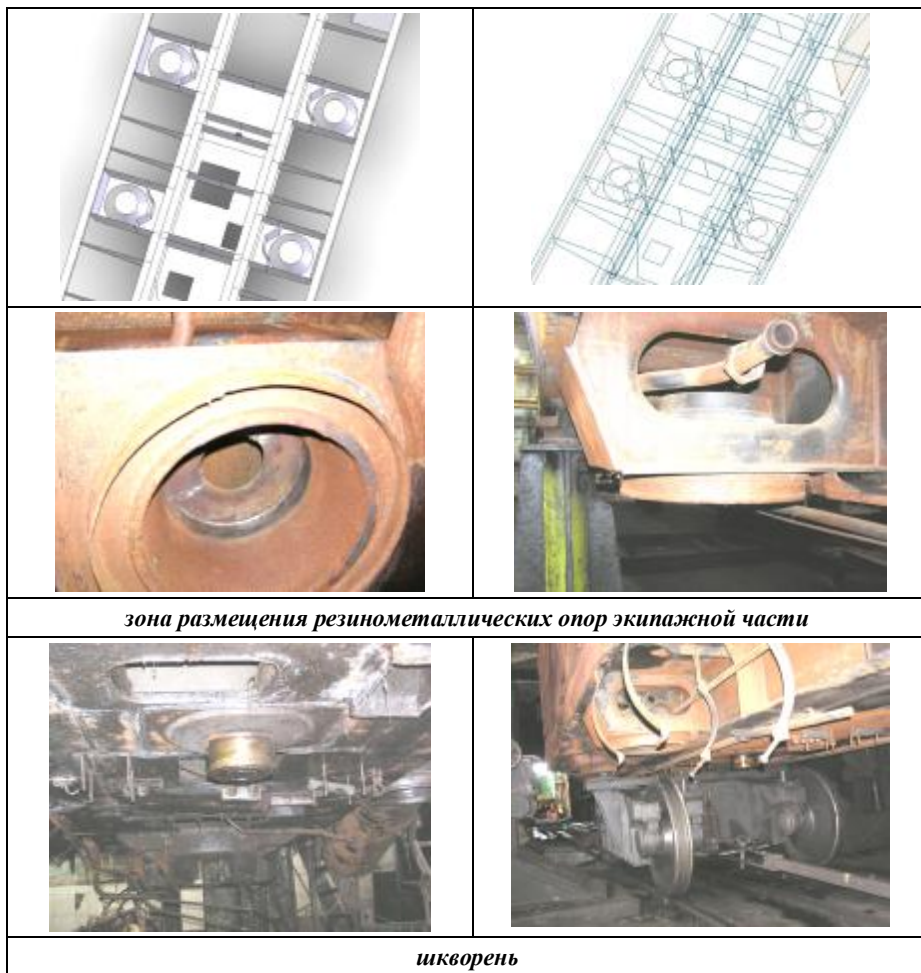


Рис.3. Опора рамы и шкворневый узел

При расчете на статическую прочность в сечениях рамы кузова определяют напряжения от сочетания режимов *a*, *г* и *д*. Учитывая редкую повторяемость таких нагрузок, расчетные напряжения сравниваются с пределом текучести материала при коэффициенте запаса $n = 1,1$. Аналогичные нормативы для аварийной подъемки кузова, а также при расчете на соударение.

Статические напряжения в кузове при трогании с учетом режимов *a* и *б* сравниваются с пределом текучести при коэффициенте запаса $n = 1,5-1,6$. При расчете кузова на выносливость учитываются режимы *a*, *в* и *е* при

коэффициенте запаса, равном двум по пределу выносливости.

Анализ конструкции и условий нагружения дает основания для вывода о том, что задача анализа напряженно-деформированного состояния рам тепловозов (даже базовой конструкции) требует проведения ряда расчетов от действия комплекса силовых воздействий. Поскольку речь идет о проведении многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния рам с возможным изменением их конструкций, то требуется разработка такой технологии проведения расчетов, при применении которой объем необходимых расчетов был бы минимальным.

Метод разложения на базовые нагрузки. В общем виде систему разрешающих уравнений для определения напряженно-деформированного состояния рам тепловозов можно представить в виде [11, 12]:

$$L(u(r), p, t) = f, \quad r \in \Omega, \quad (1)$$

где L – оператор краевой задачи;

u – перемещения точек рамы, занимающей область Ω , с радиус-вектором r ;

p – параметры, определяющие свойства материала рамы;

f – массив нагрузок, зависящих от r и времени t .

В пределах линейной постановки правую и левую части (1) можно представить в виде:

$$f(r, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i F_i(r, t), \quad (2)$$

$$u(r, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i(r, t), \quad (3)$$

где $F_i(r, t)$ – некоторые характерные базовые силовые факторы;

α_i – коэффициенты разложения.

Здесь $v_i(r, t)$ представляют собой решения отдельных задач:

$$L(v_i, P, t) = F_i, \quad i = 1, \mathbf{K}, N. \quad (4)$$

Если в распоряжении исследователя имеется достаточно полный “базис” решений v_i , то любое сочетание силовых факторов не потребует для определения напряженно-деформированного состояния рамы ничего более, чем получения соответствующей линейной комбинации v_i . При изменении параметров рамы p и области Ω требуется проведение повторной серии расчетов (4). Таким образом, для набора серий параметров $p_j^i, j = 1, \mathbf{K}, M$,

существует двухиндексный набор “базовых” решений v_i^j таких, что текущее решение представимо в виде

$$u^j = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i^j(r, t), j = 1, \mathbf{K} M. \quad (5)$$

Соответственно, все характеристики, зависящие от напряженно-деформированного состояния рам тепловозов, представимы в виде (5). Это существенно упрощает проведение параметрического анализа рамы тепловоза при изменении эксплуатационных нагрузок, поскольку сама задача разделяется на 2 этапа:

- 1) определение системы “базовых” решений v_i^j ;
- 2) собственно параметрический анализ.

Первый из указанных этапов достаточно трудоемок, ресурсоемок и зачастую требует большого времени для проведения исследований. Его можно проводить, например, с использованием метода конечных элементов, привлечением мощного программно-аппаратного обеспечения. В результате формируется база данных, содержащая результаты решения системы задач (5). Это дает возможность на втором этапе с использованием сгенерированной базы данных при решении конкретной задачи провести параметрический анализ или синтез на рядовом компьютерном оборудовании.

Конечно-элементные модели рам тепловозов. Результаты решения базовых задач. На рис.4 представлена структура специализированной САПР, реализующей описанный в работе подход для анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза на этой основе соответствующих конструктивных и технологических решений при проведении ремонтных работ ($p_{вх}, p_{вых}$ – набор входных и выходных параметров, $P_{вх}$ – входной набор динамических характеристик и распределений динамических усилий, скоростей, ускорений поддресоренного строения тепловоза).

Предложенная САПР реализует заложенный параметрический подход и связь с системами анализа динамики железнодорожных экипажей, откуда поступают данные о динамических нагрузках.

На рис.5 приведены примеры конечно-элементной модели рамы тепловоза 2ТЭ116, а на рис.6 – результаты исследования напряженно-деформированного состояния данной рамы при действии следующих “базовых” нагрузок:

- I – нагружением усилием тяги Φ ;
- II – статическое равномерное нагружение силами веса поддресоренного строения тепловоза;
- III – изгибная составляющая реакции резинометаллических опор (моменты M относительно поперечной оси рамы).



Рис.4. Структура специализированной САПР для анализа НДС и синтеза конструктивных и технологических решений при ремонте рам

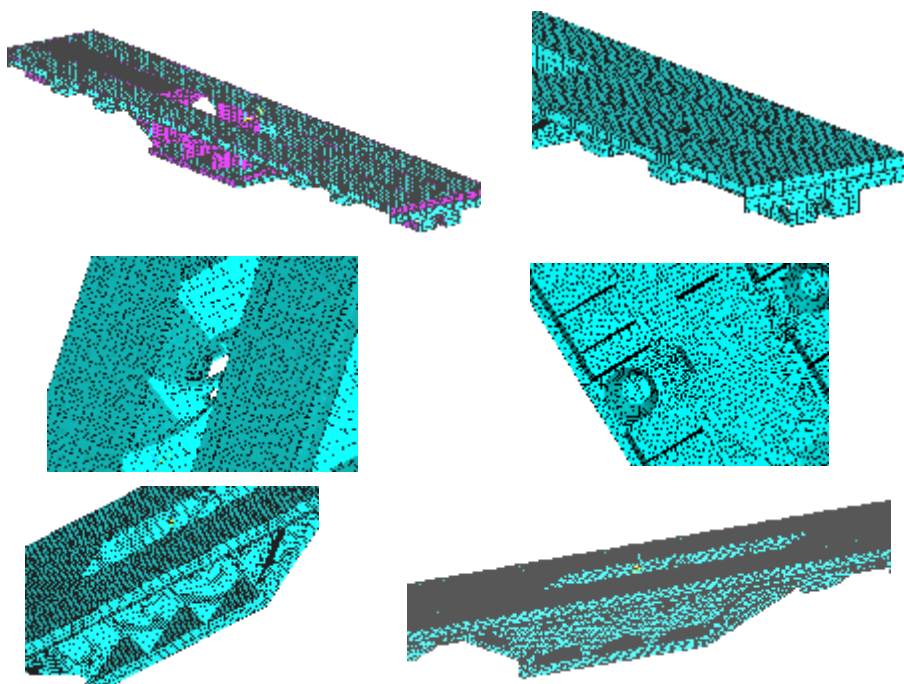


Рис.5. Примеры конечно-элементной модели рамы тепловоза 2ТЭ116

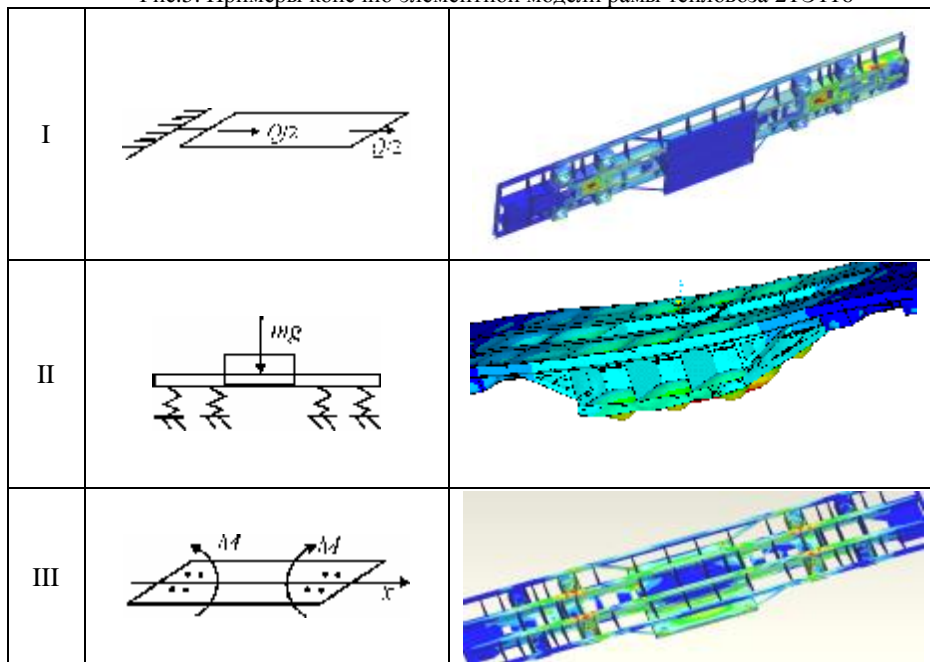


Рис.6. “Базовые” распределения напряжений в раме тепловоза 2ТЭ116 и соответствующие распределения компонент напряженно-деформированного состояния

Наряду с демонстрацией расчетных возможностей на первом этапе исследований сразу появились характерные зоны локализации напряжений и перемещений (рис.7). Наиболее напряженными являются зоны шкворневых сопряжений гнезда для расположения резинометаллических опор, а максимальные перемещения наблюдаются в средней части рамы.

Заключение. Предложенная технология исследований напряженно-деформированного состояния рам тепловозов существенно упрощает и интенсифицирует их параметрический анализ и синтез. В сочетании с применением численного метода конечных элементов становится возможным задача синтеза схем конструктивных и параметрических изменений, которые требуется выбрать в процессе ремонта или восстановления рам с целью продления работоспособности при действии эксплуатационных нагрузок.

В дальнейшем предполагается разработка полнофункциональной системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния, которая во взаимодействии с системой моделирования динамики железнодорожного экипажа позволит проводить решение

задачи анализа и синтеза рам по прочностным критериям и ограничениям.

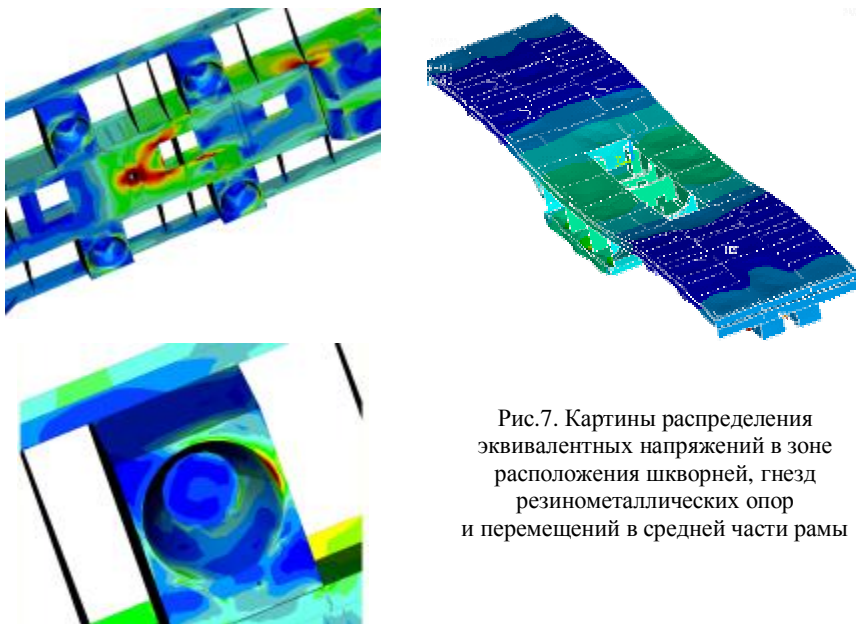


Рис.7. Картины распределения эквивалентных напряжений в зоне расположения шкворней, гнезд резинометаллических опор и перемещений в средней части рамы

Список литературы. 1. *Конструкция и динамика тепловозов* / Под ред. В.Н.Иванова. – М.: Транспорт, 1974. – 336 с. **2.** *Овечников Н.Н. и др.* Расчет несущего кузова тепловоза как стержневой системы с использованием ЭЦВМ // Тр. ВНИТИ. – Вып..129. – 1968. – С.3-39. **3.** *Апанович Н.Г. и др.* Конструкция, расчет и проектирование тепловозов. – М.: Машиностроение, 1969. – 387 с. **4.** *Технические требования к проектируемому локомотивам по условиям прочности, динамики и воздействия на путь.* – М.: Трансжелдориздат, 1964. – 20 с. **5.** *Исследование динамики и прочности вагонов* / Под ред. С.И.Соколова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с. **6.** *Кудрявцев Н.Н., Белоусов В.Н., Сасковец В.М.* Влияние коротких неровностей колес и рельсов на динамические силы и ускорения ходовых частей вагонов. – Тр. ВНИИЖТ. – 1981. – Вып.610. – С.4-23. **7.** *Белоцерковский А.Б.* Случайные колебания и прогнозирование безотказности рам тележек вагонов электропоездов. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Харьков. – 2006. – 170 с. **8.** *Тепловоз 2ТЭ116* / Филонов С.П., Гибалов А.И., Быковский В.Е. и др. – М.: Транспорт, 1985. – 328 с. **9.** *Тепловозы 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа* / Филонов С.П., Заборов А.А., Ренкунас В.В. и др. – М.: Транспорт, 1986. – 288 с. **10.** *Ушквалов В.Ф., Резников Л.М., Иккол В.С., Трубецкая Е.Ю., Редько С.Ф., Залесский А.И.* Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240 с. **11.** *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. **12.** *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

Поступила в редколлегию 08.05.2006