

Анализируя результаты, полученные при переходном динамическом анализе, можно сделать заключение о том, что наблюдается схожий характер поведения графика напряженного состояния в точке во времени, полученного в эксперименте.

**Список литературы:** 1. Барчан Е.Н., Чепурной А.Д., Ткачук Н.А. Розробка конструкції та вдосконалення параметрів решітки вибивальної транспортуючої у складі автоматизованої формувальної лінії крупного вагонного литва // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів. – 2006. – №40. – С.11-20. 2. Барчан Е.Н. Методы, модели и алгоритмы для синтеза параметров выбивной инерционной машины на основе моделирования динамических процессов // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – 2007. – №3. – С.3-17. 3. Барчан Е.Н., Ткачук Н.А., Грабовский А.В. Экспериментальное исследование динамических процессов в выбивной машине с дебалансным приводом // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – 2007. – №3. – С.14-24. 4. Барчан Е.Н. Совершенствование конструкции выбивной машины в составе автоматизированной линии крупного вагонного литва на основе расчетно-экспериментальных исследований рабочего процесса. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР” – 2007. – №23. – С.3-26. 5. Барчан Е.Н., Шкода В.А., Просняк В.В., Грабовский А.В. Экспериментальное исследование динамических процессов в оптимизированной выбивной машине. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР” – 2007. – №23. – С.26-33. 6. Барчан Е.Н., Грабовский А.В. Верификация численных моделей при исследовании выбивной машины с помощью современных САПР. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР” – 2008. – № 2. – С.8-13.

Поступила в редколлегию 02.02.08

УДК 539.3

**Ю.Б. ГУСЕВ**, гл. конструктор, ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

### **ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ, РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ**

У статті запропоновано загальний підхід до забезпечення довговічності, працездатності та збереження навантажувальної здатності мостових перевантажувачів. Розвинено стосовно них варіант методу узагальненого параметричного опису.

In the article the general approach to providing of durability, capacity and saving of loading ability of bridge loaders is offered. A variant of method of the generalized parametrical description is developed.

**Актуальность** данной статьи обусловлена необходимостью обеспечения несущей способности на всем протяжении жизненного цикла такого важного типа машин как мостовые перегружатели. Особенностью условий эксплуатации мостовых перегружателей является интенсивное воздействие внешних факторов, длительные сроки эксплуатации, утонение силовых элементов металлоконструкций, а это требует учета при их проектировании всего комплекса этих факторов. В мостовых перегружателях к тому же нужно учесть и такой неучитываемый ранее при традиционной постановке фактор, как зависимость утонения от напряженного состояния. В связи с этим, а так-

же с ограниченным значением проблемы обеспечения ресурса, долговечности и нагрузочной способности, возникает актуальная и важная научно-практическая задача разработки методов обеспечения заданного ресурса, долговечности и нагрузочной способности мостовых перегружателей за счет оптимального выбора конструктивных схем и параметров с учетом моделирования реальных условий эксплуатации и сложных нелинейных связанных физико-механических процессов на этапе проектирования.

**Постановка задачи.** Рассматривается задача оптимального синтеза металлоконструкций мостового перегружателя. В пространстве обобщенных параметров  $P$  [1-3] записываются уравнения состояния:

$$L(u, p, f, t) = 0, \quad (1)$$

где  $L$  – оператор;  $u$  – переменная состояния;  $f$  – внешнее воздействие;  $t$  – время.

Относительно этих параметров  $P$  формулируется ряд целевых функций  $I$  и ограничений:

$$I_K = I_K(P, H), \quad K = 1, n_K, \quad (2)$$

$$H_j = H_j(u) \geq H_j^*(u), \quad (3)$$

где  $H_j$  – элементы массива  $H$  характеристик состояния металлоконструкции мостового перегружателя (зависят от переменных состояния  $u$ , удовлетворяющих уравнению (1)).

Тогда формулируется задача определения таких оптимальных  $P^*$ , что:

$$I(P^*) = \sum \gamma_K I_K(P^*) \Rightarrow \min, \quad (4)$$

$$H_j(u(P^*)) \geq H_j^*(u(P^*)), \quad (5)$$

$$L(u, P^*, f, t) = 0, \quad (6)$$

где  $\gamma_K$  – некоторые весовые коэффициенты.

Данная общая формальная постановка скрывает основную особенность задачи: уравнения состояния (1), определяющие неявные зависимости  $u(P, f)$  и  $H(u, f)$ , являются существенно нелинейными и сложными. В связи с этим требуется разработка новых подходов к решению данной задачи, поскольку прямое применение традиционных постановок [4] не учитывает ни специфики решаемой задачи, ни особенностей минимизируемого функционала, ни сложности и неопределенности оператора  $I$ , ни варьированности в процессе проектирования вида и состава массива ограниченный  $H$ , а также весовых коэффициентов  $\gamma_K$ . Для математической формализации возникающей задачи предполагается привлечь метод обобщенного параметрического описания сложных механических систем [1-3]. Кроме учета перечис-

ленных выше факторов, данный подход [1-3] предоставляет широкие возможности повышения эффективности расчетного и экспериментального моделирования сложных физико-механических процессов, а также обоснования достоверности, адекватности и точности используемых математических моделей.

Соответственно, необходимо:

- адаптировать метод обобщенного параметрического описания сложных механических систем к исследованию и оптимизации конструкций мостовых перегружателей;
- предложить конкретную методику проведения исследований;
- разработать математическую, численную, экспериментальную модель для исследования физико-механических параметров в мостовых перегружателях;
- предложить тот или иной вид  $L, I, H, f$ , фигурирующих в соотношениях (1)-(6);
- реализовать предложенный метод исследований к оптимальному проектированию перегружателей по критериям работоспособности, минимальной массы, нагрузочной способности на протяжении всего срока эксплуатации.

**Метод обобщенного параметрического описания сложных механических систем для исследования мостовых перегружателей.** Метод обобщенного параметрического описания сложных механических систем представляет собой удобный и мощный инструмент формализации при решении задач анализа физико-механических процессов, параметрического и структурного анализа и синтеза, верификации расчетных моделей исследуемых объектов [1-3]. Это делает его эффективным инструментом при решении задач обеспечения работоспособности, ресурса, нагрузочной способности и минимальной массы мостовых перегружателей, в частности, перегружателя ПМГ-20 [3, 5-7]. Анализ большого массива данных обследований технического состояния перегружателей аналогичной конструкции, работающих в подобных условиях эксплуатации, позволил выделить следующие факторы, процессы и характеристики, являющиеся определяющими при решении комплексной задачи синтеза перегружателя типа ПМГ-20, которые приведены в таблице.

Видно (см. табл.), что эксплуатация перегружателя сопровождается целым комплексом процессов, требующих при необходимости учета множеств факторов. Соответственно, ограничения и критерии образуют набор величин, определяющих технические характеристики, эксплуатационные условия и экономические показатели проектируемой машины. При этом возникает комплексная задача оптимального синтеза. Кроме проблемы конкретизации вида и структуры целевой функции, одной из основных проблем при решении возникающей задачи является связанность рассматриваемых физико-механических процессов, взаимовлияние отдельных факторов и взаимообусловленность различных характеристик.

В связи с этим достаточно сложно даже после конкретизации вида, струк-

туры и состава  $L, I, H, f, P$  предложить метод поиска оптимального проекта перегружателя. Для учета особенностей решаемой задачи предлагается следующий алгоритм его рационального синтеза, показанный на рисунке.

Таблица

Характерные факторы, процессы и характеристики перегружателя ПМГ-20

| № пп | Обобщенный параметр   | Модель, процесс  | Характеристики, ограничения и критерии                             |
|------|---|--|--|
| 1.   | Структура и конструктивные параметры верхнего строения перегружателя        | Напряженно-деформированное состояние элементов перегружателя   | Грузоподъемность<br>Масса<br>Прочность<br>Жесткость                |
| 2.   | Изменение толщины элементов перегружателя в процесс длительной эксплуатации | Износ (коррозийный, механический)<br>Изменение напряженно-деформированного состояния элементов перегружателя | Грузоподъемность<br>Прочность<br>Жесткость                         |
| 3.   | Механические свойства конструкционных материалов                            | Усталость и деградация материала силовых элементов перегружателя   | Долговечность<br>Грузоподъемность                                  |
| 4.   | Размерный износ рельсов и ходовых колес грейферной тележки                  | Силовое взаимодействие колес тележки с рельсами  | Долговечность<br>Ремонтпригодность<br>Простои<br>Затраты на ремонт |

Целесообразность применения именно такого алгоритма обусловлена спецификой решаемой задачи и конструкцией машины. На этапе I производится проектирование рациональной структуры верхнего строения мостового перегружателя, обеспечивающей его низкую массу и заданную нагрузочную способность с предварительно определенной чувствительностью к изменению толщины листов металлоконструкции и механических свойств материала. На этом этапе:

$$L_I = L_I(u, f, P_I) - \quad (7)$$

оператор теории упругости для моделирования напряженно-деформированного состояния,  $u$  – вектор перемещений точек конструкции,  $f$  – действующие нагрузки,  $P_I$  – массив обобщенных параметров, описывающих структуру верхнего строения, размеры, форму сечения и толщины его элементов;

$$I_l = m(P_l) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $m$  – масса перегружателя;

$$H_l = \sigma_3^{\max}(u(P_l, f)) \leq [\sigma_3^*]_l, \quad (9)$$

где  $\sigma_3^{\max}$  – максимальные эквивалентные напряжения в конструкции,  $[\sigma_3^*]$  – допускаемые напряжения, назначаемые по критерию прочности при действии многоциклового нагружения.

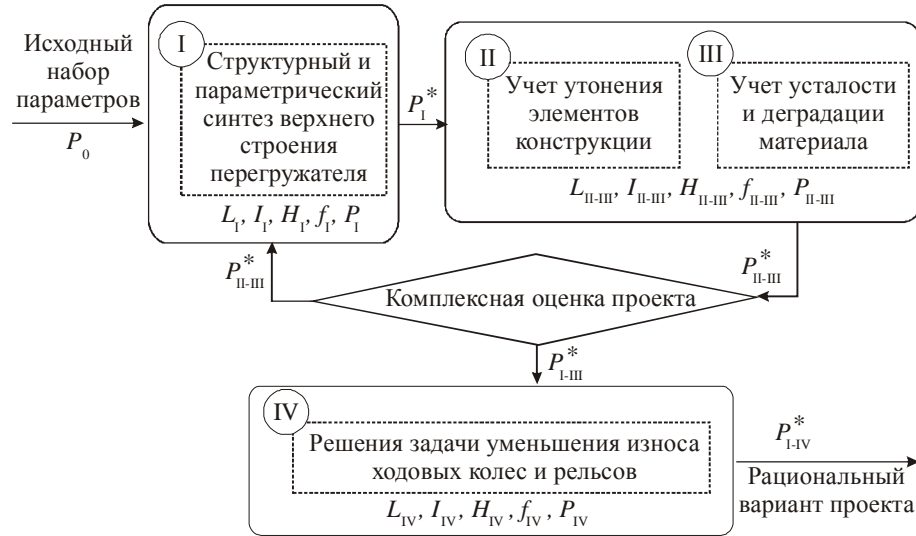


Рисунок. Алгоритм поэтапного итерационного решения задачи синтеза перегружателя на основе комплекса критериев

При этом кроме решения задачи (7)-(9) определяется также чувствительность критерия качества и ограничения к утонению листов и ухудшению механических свойств материала (образуют множество обобщенных параметров  $P_{II-III}$ ):

$$\lambda_1 = \frac{\partial I_l}{\partial P_{II-III}}; \quad \lambda_2 = \frac{\partial H_l}{\partial P_{II-III}}. \quad (10)$$

Полученный вариант параметров  $P_l^*$  является исходным при выборе проектных решений на сдвоенном этапе II-III. На этом этапе решается задача обеспечения остаточного ресурса и нагрузочной способности перегружателя в конце заданного техническим заданием срока эксплуатации с учетом одновременного действия факторов износа и деградации материала:

$$L_{II-III} = \begin{cases} h_{II} = h_{II}(t, \sigma), \\ [\sigma_3^*]_{III}' = [\sigma_3^*]_{III}(f, t), \end{cases} \quad (11)$$

где  $h$  – массив, определяющий толщины листов несущих элементов конструкций как функцию времени  $t$  и напряженного состояния  $\sigma$ ;  $[\sigma_3^*]$  – допускаемые напряжения с учетом накопления повреждений при действии сил  $f$ ;

$$I_{II-III} = I_l + \lambda_1 \cdot \Delta h_{II} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где  $\Delta h$  – изменение толщины листов;

$$H_{II-III} = H_l + \lambda_2 \Delta[\sigma_3^*]_{III} \leq [\sigma_3^*]_{II-III}, \quad (13)$$

где  $\Delta[\sigma_3^*]_{III}$  – изменение механических свойств материала.

Основная особенность задачи (связанность процессов, факторов, критериев и ограничений) при этом сохраняется, однако в первом приближении нелинейные зависимости  $I_{II-III}$  и  $H_{II-III}$  от параметров  $P_{II-III}$  заменяются линеаризованными соотношениями (12), (13). При этом нужно отметить, что допускаемая погрешность аппроксимации (12), (13) устраняется в результате итерационного процесса уточнения качества проекта (цепочка (II, III) – I на рисунке). В результате применения критериев оценки изменения самого проекта  $\epsilon_1$ , целевых функций  $\epsilon_2$  и ограничений  $\epsilon_3$

$$\epsilon_1 = \frac{\|P_{II-III}^* - P_{I-III}^*\|}{\|P_{II-III}^*\|} \leq \delta_1, \quad (14)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\|I_{II-III}^* - I_{I-III}^*\|}{\|I_{II-III}^*\|} \leq \delta_2, \quad (15)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\|H_{II-III}^* - H_{I-III}^*\|}{\|H_{II-III}^*\|} \leq \delta_3, \quad (16)$$

где  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – соответствующие ограничения,

устанавливается либо необходимость повторения цикла I-II, III, либо возможность выполнения следующего этапа синтеза IV (см. рис.). Поскольку этап IV представляет собой достаточно изолированный этап синтеза, на котором решается частная задача уменьшения износа ходовых колес грейферной тележки и рельсов, то дополнительной обратной связи (как ранее в цепочке I-II, III) – соотношения (14)-(16) – здесь не предусматривается, и получаемый набор параметров  $P_{I-IV}^*$  является окончательным. На этапе IV задача формулируется следующим образом:

$$L_{IV} = L_{IV}(f, P_{IV}), \quad (17)$$

где  $L_{IV}$  – операторная запись размерного износа при действии эксплуатационных сил  $f$ ;

$$I_{IV} = g(P_{IV}) \rightarrow \min, \quad (18)$$

где  $g$  – размерный износ;

$$H_{IV} = T(g) \geq T_{IV}^*, \quad (19)$$

где  $T$  – безремонтный срок службы ходовых колес грейферной тележки,  $T_{IV}^*$  – ограничения на безремонтный срок службы.

Предложенный алгоритм поиска рационального проектного решения при задании достаточно жестких ограничений точности  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  приводит к решению  $P_{I-IV}^*$ , достаточно близко расположенному в параметрическом пространстве к одному из локальных оптимумов. Естественно, что при варьировании начального приближения  $P_0$  будет изменяться и итоговый вариант  $P_{I-IV}^*$ . В то же время именно предложенная последовательность этапов решения задачи синтеза приводит, как правило, к достаточно удачному решению, поскольку основным этапом, определяющим структуру перегружателя и его основные конструктивные параметры, является этап I. При этом этап предполагает неявно выполнение также неформализуемых операций, осуществляемых конструкторами с опорой на опыт проектирования аналогичных машин, на сравнительный анализ характеристик и технического состояния других машин данного класса, а также на сложившиеся нормы, конструктивные схемы и традиции проектирования машин данного типа. Это позволяет изначально на этапе I задавать удачную структуру проекта, определяя при этом удовлетворительный набор конструктивных параметров силовых элементов.

На этапе II–III производится принципиальный момент корректировки текущего решения по критерию не начального, а конечного состояния машины. И, как отмечалось выше, на этапе IV производится дополнительная, слабо связанная с предыдущими этапами, корректировка по частному критерию уменьшения износа ходовых колес тележки.

Таким образом, можно утверждать, что в результате поэтапного итерационного процесса последовательного синтеза машины по комплексу критериев и ограничений не гарантируется получения оптимального в строгом смысле решения, а создаются условия получения достаточно рационального. При этом все выполняемые этапы объединены в едином цикле исследований, соединяющих на основе обобщенного параметрического описания разнородные физико-механические процессы, протекающие при эксплуатации перегружателя, с учетом различных критериев и ограничений. Это позволяет утверждать, что формально предложен метод синтеза машины по критериям обеспечения ее задан-

ной нагрузочной способности, остаточного ресурса с учетом утонения и деградации материала, а также умеренной металлоемкости.

В дальнейшем предполагается решение следующих задач:

- реализация задач исследования напряженно-деформированного состояния верхнего строения перегружателя при варьировании его структуры и конструктивных параметров силовых элементов (задача (7)-(9));
- определение чувствительности конструкции к изменению толщин и свойств материалов листов металлоконструкции (задача (10));
- определение рационального набора толщин листов, обеспечивающих нагрузочную способность машины на конечном этапе нормативного срока эксплуатации (задача (11)-(13));
- определение технического решения, обеспечивающего уменьшение до заданного уровня износа ходовых колес (задача (17)-(19)).

При этом в силу специфики каждой из описанных задач их решение осуществляется расчетным, экспериментальным или расчетно-экспериментальными методами.

**Заключение.** В статье представлен вариант метода решения задач синтеза машин по критериям обеспечения нагрузочной способности, остаточного ресурса, минимальной массы на примере перегружателя мостового грейферного. В общем виде на основе обобщенного параметрического описания и математической формализации задачи предложены новый алгоритм решения поставленной задачи, соединяющий этапы итерационного постадийного поиска улучшенного решения.

В дальнейшем планируется реализация предложенного метода в виде комплекса численных и экспериментальных исследований.

**Список литературы:** 1. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – 2005. – № 1. – С.184-194. 2. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 3. Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Гусев Ю.Б., Пеклич М.М., Барчан Е.Н., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров элементов машиностроительных конструкций // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып. „Машиноведение и САПР”. – 2005. – №53. – С.162-176. 4. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 5. Глинин Г.П., Гусев Ю.Б., Головченко В.И., Орлов Е.А. Методы автоматизированного анализа міцності та жорсткості просторових конструкцій // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып. „Машиноведение и САПР”. – 2006. – №3. – С.58-69. 6. Гусев Ю.Б., Слободяник В.А., Ткачук Н.А., Танченко А.Ю. К вопросу об определении причин сверхнормативного износа реборд колес грейферной тележки мостового крана-перегружателя // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып. „Машиноведение и САПР”. – 2007. – №33. – С.55-66. 7. Гусев Ю.Б. К вопросу об исследовании напряженно-деформированного состояния металлоконструкции перегружателя ПМГ-20 // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып. „Машиноведение и САПР”. – 2008. – № 2. – С.71-75.

Поступила в редколлегию 21.02.08