УДК 623.438: 539.3

Литвиненко А.В., Вакуленко В.В., Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Магерамов Л.К.-А.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ, ЖЕСТКОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БРОНЕКОРПУСОВ НА ВАРЬИРОВАНИЕ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Введение. Обеспечение прочностных и жесткостных свойств бронекорпусов напрямую связано с достижением тех или иных тактико-технических характеристик (ТТХ) легкобронированных машин. В ряде работ [1–3] установлено, что при возмущении проектно-технологических параметров, в частности, толщин панелей в различных проекциях, компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС) с удовлетворительной точностью могут быть представлены в виде линейных функций от изменений этих параметров.

Анализ чувствительности вибрационных характеристик к варьированию проектно-технологических параметров. Возбуждение динамических процессов в бронекорпусах легкобронированных машин приходит к перераспределению напряжений и деформаций в исследуемой конструкции при варьировании толщин. При этом существуют особые, резонансные режимы нагружения, при наступлении которых реализуются нарастающие во времени колебательные процессы. Скорость нарастания перемещений и напряжений во многом зависит от уровня демпфирования в системе и близости возбуждающих частот к собственным частотам колебаний. Это с одной стороны. С другой стороны, важна степень возбудимости той или иной собственной формы колебаний внешней нагрузкой.

В отношении бронекорпусов, особенно легкобронированных машин, задача отстройки от резонансных режимов особенно актуальна. Это объясняется сближением и частичным перекрытием спектром частот возбуждающих сил спектра собственных частот колебаний. На рис. 1 приведены эти тенденции в условном изображении зависимости амплитуд A от частот ω.

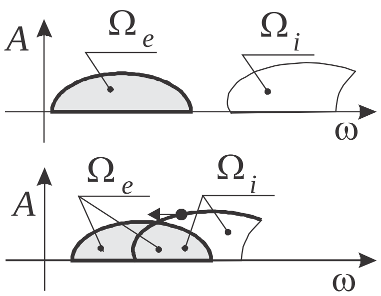

Рисунок 1 – Тенденции изменения спектров возмущающих нагрузок Ω_e и собственных частот колебаний для бронекорпусов боевых машин тяжелой (вверху) и легкой категории по массе (внизу) Ω_i

Показано, что для машин тяжелой категории по массе более характерным является сильное превышение нижнего уровня спектра собственных частот колебаний Ω_i над верхним уровнем спектра частот возбуждения Ω_e. Если же и происходит их некоторое перекрытие, то на верхних частотах возбуждения, для которых возбудимость низких форм собственных колебаний невысока. Таким образом, требование обеспечения пассивной защищенности у тяжелых машин заведомо покрывает проблемы вибровозбудимости.

Наоборот, для легкобронированных машин такая проблема порождается как раз тонкостенностью, с одной стороны, и установкой скорострельных артиллерийских систем – с другой. Темп их стрельбы может достигать сотен и даже десятков сотен выстрелов в минуту, что обуславливает наличие возбуждающих частот от единиц до десятков Герц. Кроме того, в спектре временных распределений внешних сил присутствуют и частоты, кратные частоте осуществления выстрелов. Следовательно, необходимо учитывать также частоты до 100 Гц и выше (т.е. гораздо правее на оси частот (см. рис. 1), чем у тяжелых машин). При этом избежать ситуации перекрытия в принципе невозможно, т.к. собственные частоты колебаний тонкостенных конструкций по сравнению с массивными элементами тяжелых машин имеют тенденцию к снижению (т.е. смещению влево, см. рис. 1).

Постановка задачи. В результате возникает проблема отстройки собственных частот колебаний бронекорпусов ω_i от частот возбуждения ω_s за счет варьирования некоторых проектно-технологических параметров:

$$\left|\omega_i(p)-\omega_s^*\right| \geq \Delta_{is},\ i=1,2,...;s=1,2...N_e,$$

где Δ_{is} – некоторый порог отстройки из условия ограничения амплитуды A (рис. 2).

Проблема усложняется тем, что с варьированием параметров p_{var} сложным образом изменяются жесткостные и инерционные характеристики бронекорпусов как конструкций с распределенными параметрами. В свою очередь, это приводит к тому, что разные частоты из спектра собственных частот колебаний по-разному реагируют на изменение отдельных параметров. В результате при варьировании множества частот в каких-то своих диапазонах изменения собственные частоты совершают сложные «миграции»: часть из них растет, часть – уменьшается, некоторые практически неизменны по сравнению с некоторым «базовым» варианта бронекорпуса с набором «номинальных» параметров. Более того, картина может поменяться при изменении набора варьируемых параметров, причем неочевидным и труднопрогнозируемым образом.

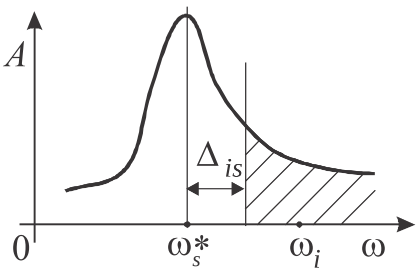

Рисунок 2 – К задаче отстройки от резонансных режимов

Таким образом, получаем в итоге достаточно сложную задачу обоснования параметров бронекорпуса по критерию отстройки от резонансного режима, представляющую собой в общей постановке задачу нелинейного программирования. Для ее решения возможно применение разнообразных методов оптимизации. В свою очередь это предполагает неоднократное решение отдельных задач анализа.

Метод решения задачи. Определение динамических, также как прочностных и жесткостных характеристик элементов машиностроительных конструкций [4–17], в настоящее время осуществляется, как правило, при помощи численных методов. В частности, особое и примущественное положение среди них занимает метод конечных элементов [18, 19]. Он обладает многими положительными качествами, в том числе возможностью моделировать напряженно-деформированное состояние, собственные частоты и формы колебаний (СЧФК) сложных машиностроительных конструкций. При этом не встречают принципиальных затруднений ни учет сложной геометрической формы, ни неоднородностей свойств материалов или их анизотропии, а также других факторов. В классическом случае для любой из поставленных задач по разработанным технологиям [18, 19] осуществляется дискретизация математической модели процесса или состояния объекта исследований, формирование системы разрешающих уравнений и производится ее решение. В результате определяются, например, искомые поля распределений компонент НДС или, как в рассматриваемом случае, наборы СЧФК и т. п.

Однако в традиционном случае получается только единичный вариант расчета той или иной конструкции с изначально заданными параметрами (геометрическая форма и размеры, физико-механические свойства материалов, нагрузки и т. д.). В развитие этих возможностей многие программные продукты (ANSYS Workbench, NX Nastran, Abaqus и т. п.) [www.ansys.com, www.3ds.com, www.plm.automation.siemens.com] оснащаются инструментами параметрического анализа и синтеза исследуемых конструкций по критериям их прочности, жесткости или динамических свойств. Эти инструменты реализуют процедуры типа «черного» или «белого» ящика. Речь идет о вычислении по итогам некоторого количества расчетов СЧФК зависимостей динамических, прочностных или жесткостных характеристик от изменяемых параметров исследуемого объекта либо о его локальной чувствительности к варьированию этих параметров. Это дает возможность проводить процедуры синтеза или хотя бы оценивать эффективность влияния различных изменений параметров на интересующие свойства проектируемой машиностроительной конструкции.

Необходимо отметить, что приемы с применением «черного» и «белого» ящиков имеют определенные недостатки. В первом случае это необходимость проведения множества расчетов СЧФК, по результатам которых определяются либо значения критериальных функций, либо их производных по тем или иным параметрам. Во втором случае определяется массив характеристик чувствительности [5–10], то есть «градиент» функции отклика, однако определенный только в одной точке параметрического пространства, что зачастую не отражает тенденций изменения критериальных функций во всем диапазоне параметров, от которых они зависят.

В связи с этим представляется целесообразным использование технологии «серого» ящика, то есть привлечение в ходе исследований дополнительной информации о характере поведения той или иной критериальной функции. В частности, представляет интерес определение зависимости динамических, а также прочностных и жесткостных характеристик бронекорпусов как тонкостенных элементов машиностроительных конструкций от распределений толщин их бронепанелей по различным проекциям конструкции, причем с учетом варьирования этих распределений. С этой целью целесообразно соединить возможности конечно-элементного анализа, с одной стороны, и достаточно простого алгоритма аналитического вычисления результатов расчета собственных частот и форм колебаний при произвольном варьировании толщин (с использованием ограниченного числа базовых расчетов), – с другой. Данный подход позволяет сводить задачу оптимизации в общей формулировке к последовательности более простых задач.

Такую постановку задачи, которая первым этапом предполагает определение чувствительности динамических характеристик к изменению параметров, рассмотрим на примере толщин панелей бронекорпусов и поперечных сечений элементов внутренней структуры усиления. При этом полагается, что уже осуществлен переход от континуальной к дискретной формулировке задачи. Иными словами, получаем уже дискретизированную систему с обобщенными координатами $x = \left\{x_1, ..., x_{N_e}\right\}^T$, для описания свободных движений которой можно применить технологию формирования уравнений Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} = 0;\ T = \dot{x}^T M\, \dot{x}_i\ ;\ \Pi = x^T K\, x,\ i = 1, ..., N_e\ ,$$

где T, Π – кинетическая и потенциальная энергии системы как функции обобщенных скоростей и координат соответственно, определяемые через матрицы масс M и жесткости K. Предполагая для малых колебаний независимость K, M от $\dot{x}, x$, уравнения малых колебаний можно представить в виде:

$$M\,\ddot{x} + Kx = 0\,.$$

Частные решения этого уравнения имеют вид: $x = \lambda \sin \omega t$, где λ – некоторая форма колебаний, тогда из него получаем

$$(M - \omega^2 K) \cdot \lambda = 0\,. \qquad (1)$$

Если в качестве способа дискретизации выбрать метод конечных элементов (МКЭ) [18, 19], то система уравнений (1) сводится к анализу свойств конечно-элементных моделей бронекорпусов.

Таким образом, исследуется задача конечно-элементного анализа собственных частот и форм колебаний пластинчато-стержневых пространственных конструкций, моделируемых Shell-элементами [www.ansys.com]. При этом распределение толщин по Shell-«скелету» конечно-элементного ансамбля является изменяемым. Эта изменяемость может быть виртуальной (например, вследствие изменения распределения толщин различных элементов конструкции на этапе проектных разработок исходя из тех или иных соображений), согласованной (как пример – на этапе технологической подготовки производства изделия вследствие компромиссных согласований между проектантами и технологами), вынужденной (на этапе производства вследствие разброса толщин поставляемого на предприятие-изготовитель материала), случайной (в ходе эксплуатации в условиях воздействия множества факторов стохастического характера: коррозионное деградирование, механический износ, наплавка и наварка материала при ремонте и т.п.). В любом случае все эти процессы можно с точки зрения влияния на конечно-элементную модель исследуемого объекта характеризовать следующим образом: на начальном этапе имеется некоторый ее базовый (начальный) вариант с установлением номинального распределения толщин; на последующих этапах производится незначительное изменение номинальных толщин в сторону их уменьшения или увеличения (либо целенаправленное варьирование, либо детерминированное или случайное уменьшение/увеличение).

С учетом отмеченных обстоятельств задачи определения собственных частот и форм колебаний при помощи МКЭ можно сформулировать в общем виде следующим образом:

$$Det\Big(K\left(h\right) - \omega^2 M\left(h\right)\Big) = 0\,. \qquad (2)$$

Здесь $K(h)$, $M(h)$ – матрицы жесткости и масс конечно-элементного ансамбля, зависящие от распределения толщин, задаваемого массивом h толщин h_k (k = 1, …, N_e – номера конечных элементов); ω^2 – искомые собственные частоты колебаний.

Рассмотрим, не снижая общности, процесс изменения толщин h_k на примере варьирования толщины поверхностных слоев элементов конструкции бронекорпуса в сторону их уменьшения:

$$h_k = h_k^0\left(1-\alpha_k\right),\ k = 1,\ \ldots,\ N_e. \tag{3}$$

В выражении (3) h_k^0 – массив номинальных толщин, а $\alpha_k \in [0;1)$ – безразмерный коэффициент (интенсивность утонения). Распределение α_k задает «карту утонения», т.е. распределение интенсивностей утонения по Shell-«скелету» конечно-элементного ансамбля. Тогда, учитывая, что α_k<<1, можно поставить задачу следующим образом: как при варьировании распределений интенсивности утонения $\alpha = \{\alpha_k\}^T$ изменяется решение задачи (2) в окрестности $\alpha = 0$, то есть определение зависимостей

$$\omega_i^2 = \omega_i^2\left(\alpha\right), \tag{4}$$

где i =1,2… – номера собственных частот колебаний, являющихся корнями уравнений (2).

Другими словами, предлагается установить параметрическую зависимость изменений решений задач (2) при малом варьировании (т.е. изменении интенсивностей утонений/утолщений) по сравнению с номинальным вариантом конструкции (в данном случае – исходным).

Спектр собственных частот ω_i, как отмечалось, определяется как набор положительных корней (2). Естественно, что базовыми возмущаемыми величинами являются матрицы K, M. Рассмотрим их изменения и влияния на решения (2) на примере утонения элементов исследуемого объекта. Тогда введем в рассмотрение операцию сборки O, которая по координатам узлов (т.е. матрице координат U) и матрице элементов C (т.е. списку узлов, входящих в образуемые ими КЭ) производит формирование матриц K и M:

$$K = O\left(k^e\right),\ e = 1,\ldots,N_e,\quad M = O\left(m^e\right),\ e = 1,\ldots,N_e, \tag{5}$$

где k^{ε}, m^{ε} – матрицы жесткости и масс отдельных конечных элементов, число которых в ансамбле N_e [11, 18].

Операция O как бы «наслаивает» в соответствующих ячейках матриц K и M влияние от всех конечных элементов. Проанализируем влияние изменений свойств отдельных элементов на компоненты k^{ε}, m^{ε}, а затем, проведя операцию сборки, оценим общий эффект на матрицах K, M.

Рассмотрим, следуя работе [17], подход к решению задачи. В частности, как следует из этой работы, элементы матриц жесткости и масс будут состоять из двух компонент:

$$k_{ij} = k_{il}^{(0)} - \alpha^e k_{il}^{(e)},\quad m_{il}^{(e)} = m_{il}^{(0)} - \alpha^e m_{il}^{(e)}, \tag{6}$$

т.е. текущее состояние определяется в зависимости от коэффициента $\alpha^e = \alpha^e(t)$. При этом данный коэффициент может меняться от узла к узлу, может быть разным для масс и жесткостей в одном узле. Важной особенностью является то, что при α<<1 компоненты матриц K и M состоят из 2-х слагаемых: первая соответствует компонентам «номинальных» матриц K, M (т.е. $K(0)$, $M(0)$), а вторая образуется путем операции сборки из матриц, все компоненты которых являются линейными комбинациями «номинальных» матриц с малыми коэффициентами α. Тогда:

$$K\left(\alpha\right) = K_0 - K_0', \tag{7}$$

$$M\left(\alpha\right) = M_0 - M_0'. \tag{8}$$

Здесь в K_0, M_0 сосредоточены компоненты, не зависящие от α, а в K_0', M_0' – зависящие от них линейно.

Изменение собственных частот колебаний конструкции. Обращаясь к задаче анализа спектра частот собственных колебаний (2), рассмотрим сначала задачу поиска квадрата первой (низшей) собственной частоты как абсолютного минимума функции Рэлея R [16]:

$$\omega_1^2 = \min R = \min\left\{\sum K_{ij} y_i y_j \,/ \sum M_{ij} y_i y_j\right\}. \tag{9}$$

Здесь K_{ij}, M_{ij} – компоненты матриц K и M, а y_k – компоненты пробных распределений, приближающих первую собственную форму колебаний A с компонентами A_k.

Находя достаточно хорошее приближение $\omega_1^2(\alpha)$, можно использовать то обстоятельство [16], что сама собственная частота, определяемая по функции Рэлея, при изменении формы A отклоняется от точного значения незначительно. В силу этого при малых α можно не делать различий между формами $A(0)$ и $A(\alpha)$. Тогда

$$\omega^2(\alpha)=\omega_0^2\left(1-\sum_{i,j}K_{ij}{}'A_iA_j\Big/\sum_{i,j}K_{ij}^0A_iA_j\right)\Big/\left(1-\sum_{i,j}M_{ij}{}'A_iA_j\Big/\sum_{i,j}M_{ij}^0A_iA_j\right), \qquad (10)$$

где $\omega_0^2=\sum_{i,j}K_{ij}^0A_iA_j\Big/\sum_{i,j}M_{ij}^0A_iA_j$, можно сделать вывод, что по сравнению с неутоненной конструкцией нижняя собственная форма колебаний либо растет, либо уменьшается, либо остается неизменной в зависимости от скоростей роста числителя и знаменателя (10). Переписав для малых α последнее выражение в виде:

$$\omega^2(\alpha)\approx\omega_0^2(1-\delta_K)(1+\delta_M), \qquad (11)$$

где δ_K, δ_M – отношения значений билинейных форм, вычисляемых для возмущений, вызванных утонением, и для базового неутоненного варианта (соответственно, для матриц K и M), можно принять

$$\omega^2(\alpha)\approx\omega_0^2(1-\delta_K+\delta_M);\quad \omega(\alpha)\approx\omega_0\big(1-(\delta_K-\delta_M)/2\big). \qquad (12)$$

Учитывая, что δ_K, δ_M линейно зависят от параметров α, то и ω^2, и ω имеют приближенно линейную зависимость от степени утонения элементов машиностроительных конструкций. При этом, поскольку для определения более высоких частот колебаний с использованием функции Рэлея ищется ее условный экстремум на формах, ортогональных предшествующим, то вместо задачи минимизации получаем последовательность минимаксных задач. При этом, однако, вид самой функции Рэлея сохранится, и все выкладки сохранятся теми же. При малых α останутся справедливыми те же оценочные соотношения (11), (12), однако входящие в них величины δ_K, δ_M изменятся, в силу чего может измениться и тенденция «миграции» той или иной частоты в спектре исследуемого объекта.

Полученные соотношения дают возможность построить линеаризированные аппроксимационные зависимости

$$\omega\big(p_1(1-\alpha_1),...,p_i(1-\alpha_i)...p_N(1-\alpha_N)\big)=\omega_0-\sum_j\alpha_j\cdot\frac{\omega(\alpha_j^*)-\omega_0}{\alpha_j^\wedge}. \qquad (13)$$

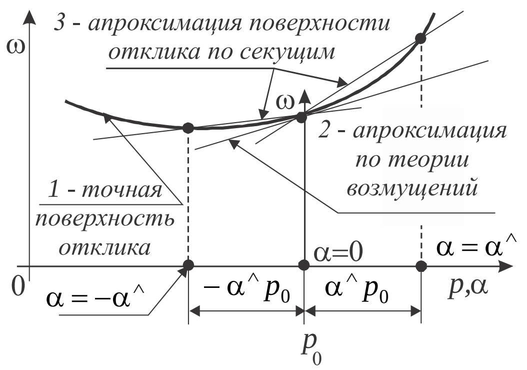

Рисунок 3 – Аппроксимация поверхности отклика

Здесь $\alpha^*_{(j)}=\{0,...,\alpha_j^\wedge,0,...0\}^T$ – набор нулевых α с ненулевым изменением на предельную величину возможного варьирования j-го компонента этого массива $\alpha_j^\wedge$; $\omega(\alpha^*_{(j)})$ – точное решение задачи определения собственных частот колебаний бронекорпуса (следуя работе [1], данные решения называются «реперными»).

Полученное представление дает возможность применить «конечно-разностные» значения чувствительностей вместо «дифференциальных», т.е. вместо приближения (согласно теории возмущений) поверхности отклика 1 (рис. 3) касательной 2 предлагается ее аппроксимировать пучком секущих 3.

В отличие от [1], в данной работе предлагается, во-первых, для случая многомерного параметрического пространства, использовать для аппроксимации не гиперплоскости, а набор лепестков по каждому гиперквадранту в системе координат $\alpha_1\ldots\alpha_N$, причем изменять набор «реперных» решений для формирования характеристик чувствительности при изменении базовой точки B (рис. 4).

Получается, таким образом, «плавающий» набор реперных решений, т.е. поверхности отклика изменяют свою конфигурацию при переходе, например, из точки B_1 в точку B_2 (см. рис. 4). Естественно, что такую операцию уместно осуществлять не на каждом шаге уточнения решения, а через некоторое их количество. Этим самым повышается степень «локальной прозрачности серого ящика».

Таким образом, предложенный прием отличает данный метод аппроксимации от использованного в [1] еще и тем, что изменяется не только текущее положение точки В (т.е. набора номинальных параметров Р, в окрестности которых осуществляется аппроксимация поверхности отклика), но и величины шага $\alpha^{\wedge}$. В результате в (13) эти величины являются варьируемыми, тогда как в [1] они – константы. Другими словами, степень прозрачности увеличивается в той части "серого ящика", куда перемещается текущее итерационное приближение искомого решения задачи синтеза.

Для решения полученной задачи отстройки, таким образом, можно применить алгоритмы линейного программирования, т.к. и целевая функция, и ограничения приобретают линейный вид. При этом предложенные усовершенствования при формировании аппроксимационных представлений функции отклика (13) еще больше повышают точность вычислений.

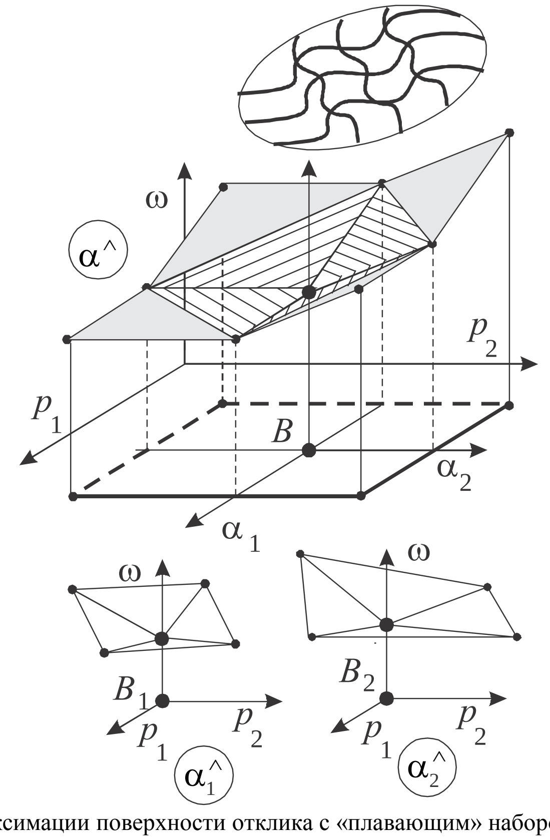

Рисунок 4 – К аппроксимации поверхности отклика с «плавающим» набором реперных решений

Заключение. Анализ полученных и описанных в работе результатов дает основание сделать следующие выводы.

1. В работе расширен подход к решению задач синтеза проектно-технологических решений, обеспечивающих заданные составляющие комплекса тактико-технических характеристик. Он состоит в развитии метода обобщенного параметрического моделирования процессов и состояний бронекорпусов путем дополнения параметрического пространства технологическими режимами и условиями производства, оказывающими существенное влияние на достижение тех или иных конструктивно заложенных ТТХ в реальном изделии – боевой машине.

2. Задача отстройки от резонансных режимов путем обоснования проектно-технологических решений и параметров бронекорпусов поставлена как задача нелинейного программирования. Далее на основе применения нового подхода с использованием технологии «серого ящика» эта задача сводится к определению чувствительности на основе решения серии пробных задач при конечном варьировании парамет-

ров. Получаемый набор «реперных» решений дает основу для сведения задачи к серии задач линейного программирования. Этим достигается соединение преимуществ традиционных технологий «белого ящика» и «черного ящика», в то же время устраняются их недостатки – значительная погрешность и ресурсозатратность соответственно.

3. В дополнение к традиционным подходам предложено использовать «лепестковую» структуру поверхности отклика и «плавающий» набор реперных решений, что увеличивает точность вследствие локализации аппроксимационных поверхностей в тех подобластях, куда перемещается текущее итерационное приближение искомого решения задачи синтеза, причем аппроксимация осуществляется на все более сжимающейся окрестности текущей точки параметрического пространства. В результате достигается увеличение степени "прозрачности серого ящика" не повсюду, а локализовано, что еще более повышает точность аппроксимации действительной поверхности отклика. В конечном счете получаемый метод сочетает и точность, и экономность, которые существенно превышают свойства традиционных методов.

В дальнейшем предложенный подход будет использован при решении прикладных задач обеспечения тактико-технических характеристик современных легкобронированных машин путем обоснованного выбора проектно-технологических параметров.

Литература

1. Танченко А.Ю. Методы расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций при изменении толщины в процессе эксплуатации: дис… кандидата техн. наук: 05.02.09 – динамика и прочность машин / Танченко Андрей Юрьевич. – Харьков, 2013. – 209 с.

2. Танченко А.Ю. Динамические и прочностные характеристики тонкостенных элементов машиностроительных конструкций при уменьшении толщины в процессе эксплуатации / А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук, И.В. Артемов, А.В. Литвиненко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – 2013. – Вып.2. – С. 210–213.

3. Ткачук Н.А. Линеаризация функции отклика прочностных и динамических характеристик тонкостенных конструкций на изменение толщины / Н.А. Ткачук, А.В. Литвиненко, Ю.В. Костенко, А.Ю. Танченко, А.В. Грабовский // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – №14 (1057). – С. 138–154.

4. Карманов В.Г. Математическое программирование: Учеб. пособие. — 5-е изд., стереотип. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 264 с.

5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 536 с.

6. Гузь А.Н. Метод возмущения формы границы в механике сплошных сред / А.Н. Гузь, Ю.Н. Немиш. – К.: Вища школа, 1989. – 352 с.

7. Штейнвольф Л.И. Динамические расчеты машин и механизмов. М.– К.: МАШГИЗ, 1961. – 340 с.

8. Симсон Э.А. Методика анализа чувствительности вибрационных параметров механических систем / Э.А. Симсон, С.А. Назаренко, М. В. Трохман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2/4 (32). – 2008. – С. 44–47.

9. Голоскоков Е.Г. Нестационарные колебания механических систем / Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. – К.: Наукова думка, 1966. – 335 с.

10. Гринев В.Б. Оптимизация стержней по спектру собственных значений / В.Б. Гринев, А.П. Филиппов. – К.: Наук. думка, 1979. – 211 с.

11. Fish J. A First Course in Finite Elements PDF / J. Fish, T. Belytschko. – John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 336 p.

12. Долинский В.М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу / В.М. Долинский // Динамика и прочность машин. – 1975. – Вып. 21. – С. 43–49.

13. Долинский В.М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / В.М. Долинский // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. – Саратов, 1983. – С. 61–67.

14. Пронина Ю.Г. Оценка долговечности упругой трубы под действием продольной силы и давления в условиях равномерной поверхностной коррозии / Ю.Г. Пронина // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 2. – С. 41–44.

15. Пронина Ю.Г. Расчет долговечности упругой трубы под действием продольной силы, давления и осесимметричного нагрева в условиях равномерной коррозии / Ю.Г. Пронина // Проблемы прочности и пластичности. – 2009. – Вып. 71. – С. 129–135.

16. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 560 с.

17. Танченко А.Ю. Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения / А.Ю. Танченко // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – №23 (996). – С. 138–145.

18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

19. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

Bibliography (transliterated)

1. Tanchenko A.Yu. Metodyi rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkostennyih konstruktsiy pri izmenenii tolschinyi v protsesse ekspluatatsii: dis… kandidata tehn. nauk: 05.02.09 – dinamika i prochnost mashin. Tanchenko Andrey Yurevich. – Harkov, 2013. – 209 p.

2. Tanchenko A.Yu. Dinamicheskie i prochnostnyie harakteristiki tonkostennyih elementov mashinostroitelnyih konstruktsiy pri umenshenii tolschinyi v protsesse ekspluatatsii. A.Yu. Tanchenko, N.A. Tkachuk, I.V. Artemov, A.V. Litvinenko. Aktualnyie voprosyi mashinovedeniya: cb. nauch. tr. Ob'edin. in-t mashinostroeniya NAN Belarusi; redkol.: A.A. Dyuzhev [i dr.]. – 2013. – Vyip.2. – P. 210–213.

3. Tkachuk N.A. Linearizatsiya funktsii otklika prochnostnyih i dinamicheskih harakteristik tonkostennyih konstruktsiy na izmenenie tolschinyi. N.A. Tkachuk, A.V. Litvinenko, Yu.V. Kostenko, A.Yu. Tanchenko, A.V. Grabovskiy. Visnik NTU «HPI». Zb. nauk. prats. SerIya: Transportne mashinobuduvannya. – H. : NTU «HPI», 2014. – #14 (1057). –P. 138–154.

4. Karmanov V.G. Matematicheskoe programmirovanie: Ucheb. posobie. — 5-e izd., stereotip. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 264 p.

5. Marchuk G.I. Metodyi vyichislitelnoy matematiki. G.I. Marchuk. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1980. – 536 p.

6. Guz A.N. Metod vozmuscheniya formyi granitsyi v mehanike sploshnyih sred. A.N. Guz, Yu.N. Nemish. – K.: Vischa shkola, 1989. – 352 p.

7. Shteynvolf L.I. Dinamicheskie raschetyi mashin i mehanizmov. M.– K.: MAShGIZ, 1961. – 340 p.

8. Simson E.A. Metodika analiza chuvstvitelnosti vibratsionnyih parametrov mehanicheskih sistemp E.A. Simson, S.A. Nazarenko, M. V. Trohmanp Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. – 2/4 (32). – 2008. – P. 44–47.

9. Goloskokov E.G. Nestatsionarnyie kolebaniya mehanicheskih system. E.G. Goloskokov, A.P. Filippov. – K.: Naukova dumka, 1966. – 335 p.

10. Grinev V.B. Optimizatsiya sterzhney po spektru sobstvennyih znacheniy. V.B. Grinev, A.P. Filippov. – K.: Nauk. dumka, 1979. – 211 p.

11. Fish J. A First Course in Finite Elements PDF. J. Fish, T. Belytschko. – John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 336 p.

12. Dolinskiy V.M. Izgib tonkih plastin, podverzhennyih korrozionnomu iznosu. V.M. Dolinskiy. Dinamika i prochnost mashin. – 1975. – Vyip. 21. – P. 43–49.

13. Dolinskiy V.M. Raschet elementov konstruktsiy, podverzhennyih ravnomernoy korrozii. V.M. Dolinskiy. Deformirovanie materialov i elementov konstruktsiy v agressivnyih sredah. – Saratov, 1983. – S. 61–67.

14. Pronina Yu.G. Otsenka dolgovechnosti uprugoy trubyi pod deystviem prodolnoy silyi i davleniya v usloviyah ravnomernoy poverhnostnoy korrozii. Yu.G. Pronina. Deformatsiya i razrushenie materialov. – 2009. – # 2. – P. 41–44.

15. Pronina Yu.G. Raschet dolgovechnosti uprugoy trubyi pod deystviem prodolnoy silyi, davleniya i osesimmetrichnogo nagreva v usloviyah ravnomernoy korrozii. Yu.G. Pronina. Problemyi prochnosti i plastichnosti. – 2009. – Vyip. 71. – P. 129–135.

16. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy. – M.: Nauka, 1968. – 560 p.

17. Tanchenko A.Yu. Vliyanie tolschinyi paneley na spektr sobstvennyih chastot kolebaniy korpusov transportnyih sredstv spetsialnogo naznacheniya. A.Yu. Tanchenko. VIsnik NTU «HPI». Zb. nauk. prats. SerIya: Mashinoznavstvo ta SAPR. – HarkIv : NTU «HPI», 2013. – #23 (996). –P. 138–145.
18. Zenkevich O. Metod konechnyih elementov v tehnike . O. Zenkevich. – M.: Mir, 1975. – 541 p.
19. Vasidzu K. Variatsionnyie metodyi v teorii uprugosti i plastichnosti. K. Vasidzu.– M.: Mir, 1987.– 542 p.

УДК 623.438: 539.3

Литвиненко О.В., Вакуленко В.В., Ткачук М.А., Бруль С.Т., Магерамов Л.К.-А.

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ МІЦНІСНИХ, ЖОРСТКІСНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БРОНЕКОРПУСІВ НА ВАРІЮВАННЯ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

У статті описано підхід до визначення чутливості спектра власних частот коливань корпусів легкоброньованих машин до зміни проектно-технологічних параметрів. Встановлено, що в досить широких діапазонах залежності власних частот коливань від змінних параметрів можна лінеаризувати. При цьому забезпечується задовільна точність апроксимації даних залежностей. Це дає можливість застосовувати апроксимаційні залежності при розв'язанні задач обґрунтування проектно-технологічних параметрів бронекорпусів за критеріями забезпечення заданих тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин.

Litvinenko A.V., Vakulenko V.V., Tkachuk M.A., Brul S.T., Mageramov L.K.-A.

ESTIMATION OF SENSITIVITY OF STRENGTH, RIGIDITY AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ARMORED HULLS ON VARYING OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS

The paper describes an approach to definition of sensitivity spectrum of eigenfrequencies of natural of light armored vehicles to change of design and technological parameters. It is established that dependence of vibration eigenfrequencies from varying parameters can be linearized in a fairly wide ranges. In this satisfactory approximation accuracy of these dependencies is ensuring. This makes it possible to use the approximation depending on the solution of problems of design and rationale of process parameters on the hulls on criteria specified performance characteristics of light armored vehicles.