

doi: 10.32620/oikit.2019.83.04

УДК 629.7.01

С. В. Филипковский, В. А. Павлюченко, Е. А. Стрельникова

Оптимизация упруго-демпферных подвесок оборудования системы кондиционирования воздуха самолёта

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Государственное предприятие «Антонов»
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины*

Проектирование защиты от перегрузок оборудования в блоке кондиционирования воздуха самолёта требует использования достаточно эффективных методов анализа вибрационных характеристик подвески, а также разработки соответствующего специфике задачи метода оптимального синтеза. Для решения задачи применён гибридный адаптивный метод оптимизации. Объектом оптимизации является конструкция подвески блока кондиционирования воздуха с несимметричным распределением масс и расположением связей. Связями являются узлы крепления в виде амортизаторов и сильфоны для стыковки с трубами. Блок считается твердым телом. Связи выделены в качестве оптимизируемых элементов.

Целью работы является усовершенствование метода оптимизации параметров амортизаторов, которые обеспечивают защиту от вибрации и ударных эксплуатационных нагрузок.

В предлагаемом методе оптимизации использован ряд методов, которые названы гибридами. Задан критерий, по которому выбирают наиболее эффективные гибриды. В этот критерий входит информация, характеризующая меняющуюся ситуацию; а именно признаки структуры и метрических параметров пространства, где осуществляется поиск; предыстория вычислительного процесса, по которой устанавливается возможное продолжение; природа системы функций, определяющих решаемую задачу. Введено адаптивное управление, которое осуществляет получение векторов решений, направлений поиска и поисковых шагов, соответственно изменяющейся ситуации. Поскольку эффективно минимизировать массу удается только при совместной минимизации перегрузки – параметра, на границу которого выходит процесс поиска решения задачи, то естественно использовать многокритериальную оптимизацию. В данном случае – одновременно оптимизировать массу и перегрузку. Ограничения накладывают на конструктивные размеры и прочность амортизаторов. В результате проведенной оптимизации уменьшена масса элементов подвески и воздействующая на подвешенный блок перегрузка. Определены пределы, до которых могут быть уменьшены масса и перегрузка.

Ключевые слова: блок кондиционирования воздуха, амортизационная подвеска, масса, перегрузка, оптимизация, гибридный адаптивный метод.

Введение

Амортизационные подвески системы кондиционирования воздуха самолёта должны обеспечивать необходимую вибро- и ударозащиту при сохранении работоспособности оборудования на протяжении всего эксплуатационного срока.

В качестве объекта оптимизации рассматриваем конструкцию подвески блока кондиционирования воздуха (БКВ), содержащего турбохолодильник с вращающимся ротором, с несимметричным распределением масс и расположением связей. БКВ установлен в передней части ниши шасси, как показано на рис. 1. В полёте на БКВ действует вибрация, которая передаётся по силовому набору планера и узлам крепления блока к шпангоутам. Эти узлы

представляют собой собранные в пакеты амортизаторы типа АПН. В случае грубой посадки самолёта на блок действуют ударные эксплуатационные нагрузки. Величины и частоты расчётных вибрационных и ударных нагрузок регламентированы квалификационными требованиями [1]. Блок будем считать твердым телом. Связи выделим в качестве оптимизируемых элементов. Связями являются узлы крепления в виде амортизаторов и сильфоны стыковки с трубами.

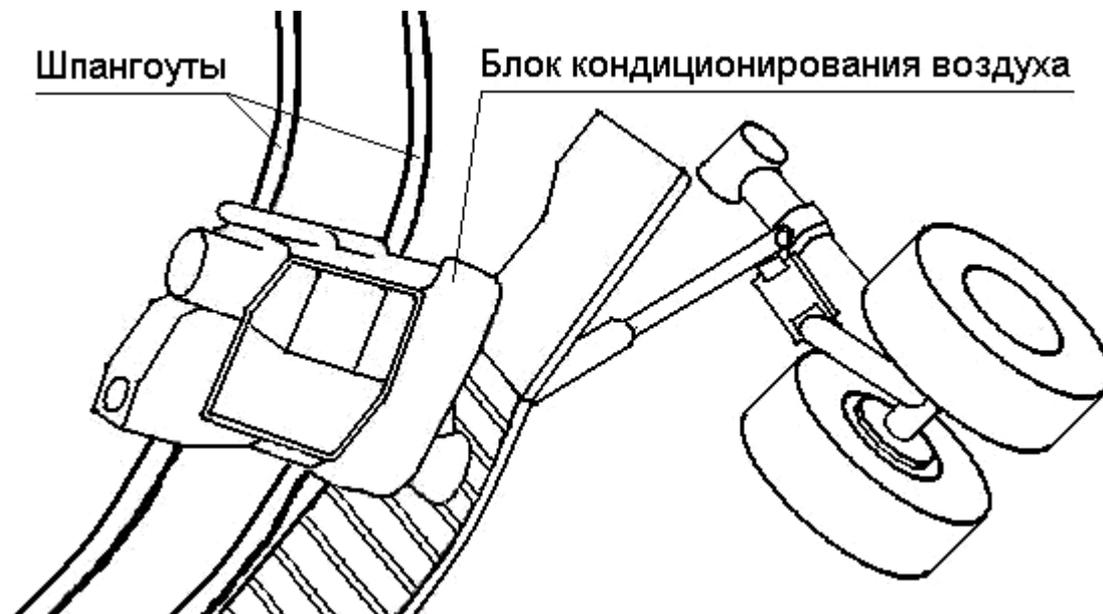


Рис. 1. Расположение БКВ в нише шасси

Значительное количество оборудования различного функционального назначения в БКВ требует использования достаточно эффективных методов анализа вибрационных характеристик и напряженно-деформированного состояния подвески, а также соответствующего специфике задачи метода оптимального синтеза.

Целью работы является усовершенствование метода оптимизации параметров амортизаторов, которые обеспечивают защиту от вибрации и ударных эксплуатационных нагрузок.

Задача синтеза реальных конструкций моделируется сложными многомерными и нелинейными системами дифференциальных уравнений в частных производных со многими функциональными связями и ограничениями [2]. В статье [3] предложены математические формулировки основных проблем оптимизации, описаны и сравнены различные методы решения поставленных задач. Практика решения оптимизационных задач такого уровня сложности показывает, что гарантированное достижение результата возможно лишь при последовательном и совместном использовании нескольких методов прямого поиска экстремума [4, 5]; это является более гибким и надежным подходом по сравнению с дифференциальными методами высокого порядка.

В работе [6] проведен анализ предлагаемых в конечноэлементных комплексах методов оптимизации и показано, что они малоэффективны в задачах, в которых области изменения варьируемых параметров имеют сложную форму. Гибридный адаптивный метод оптимизации позволяет

эффективно решать задачи оптимального синтеза упругих подвесок с нелинейным демпфированием.

1. Метод оптимизации

Суть предлагаемого метода оптимизации заключается в том, что выбран ряд методов-гибридентов $\{M_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, N$). Задан критерий $Q(\sigma)$, который выясняет в процессе решения, какой из гибридентов в данной ситуации σ наиболее эффективно может использоваться для достижения поставленной цели. В критерий ситуации Q входит независимая от методов информация, которая характеризует собственно меняющуюся ситуацию; а именно признаки структуры и метрические параметры пространства, где осуществляется поиск; предысторию вычислительного процесса, по которой устанавливается возможное продолжение; природу системы функций, определяющих решаемую задачу; и т.п.

Далее вводится функция управления $u = u(Q(\sigma))$, на основе которой устанавливают адаптивную стратегию введения в действие конкретного гибридента $\{M_k\} \in \{M_i\}$ или группы гибридентов. Для того, чтобы общее действие гибридентов обеспечивало более эффективное достижение цели, чем каждый из них отдельно, вводят специальное адаптивное управление, которое осуществляет получение минимизирующей последовательности векторов $\{X_k^r\}$, направлений поиска $\text{Dir}X_k^r$ и поисковых шагов h_k^r , адаптируемых соответственно изменяющейся ситуации σ .

Операцию гибридизации или получение гибридной точки X_k^Γ на k -м шаге процесса можно определить в виде матрично-векторного «произведения»

$$X_k^r = \left(U_j^{(i)} \right) \left(X_j^{(i)} V(r) \right),$$

$$\sum_{i=1}^N U_j^{(i)} = \sum_{j=k-r+1}^N V_j(r) = 1, \quad j = \overline{k-r+1, k}, \quad k \geq r,$$

где $\left(U_j^{(i)} \right)$ и $\left(X_j^{(i)} \right)$ – матрицы (размерности $r \times N$) управления и состояния, элементами которых являются управления (скаляры) $U_j^{(i)}$ и приближения (векторы размерности n) $X_j^{(i)}$ гибридентов на данном шаге j ;

$V(r)$ – r -мерный «сжимающий» вектор со скалярными компонентами $V_j(r)$;

r – глубина памяти гибридентов;

N – их количество.

Специальное произведение скалярной $\left(U_j^{(i)} \right)$ и векторной $\left(X_j^{(i)} \right)$ матриц дает вектор Z , компонентами которого являются векторы в виде

$$Z_j = \sum_{i=1}^m U_j^{(i)} X_j^{(i)}, \quad j = \overline{k-r+1, k}, \quad k \geq r,$$

а результатом произведения этого вектора на вектор $V(r)$ является n -мерный вектор

$$X_k^r = \sum_{j=k-r+1}^N V_j(r) \sum_{i=1}^N U_j^{(i)} X_j^{(i)}, \quad k \geq r.$$

На каждом шаге процесса $k \geq r$ проводится изъятие верхней и присоединение нижней строк матриц $(U_j^{(i)})$ и $(X_j^{(i)})$, так что общее количество строк остается неизменным. Принятая глубина памяти r гибридного метода требует некоторого знания предыстории процесса, в котором учитывается r предыдущих приближений, а сжимающий вектор $V(r)$ играет роль механизма последовательного забывания старой информации. Компоненты $V_j(r)$ вектора $V(r)$ изменяются согласно некоторым законам от предыдущих к текущим. В [7, 8] доказано, что гибридный метод может решать широкий круг задач более эффективно, чем каждый из упомянутых гибридов.

2. Расчётная модель подвески блока оборудования

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрена задача снижения веса виброзащиты и перегрузок БКВ. Его собственные инерционные характеристики не меняются, а варьируются обобщенные параметры подвески – коэффициенты жесткости k и демпфирования c (рис. 2).

Ограничения накладываются на конструктивные размеры и прочность амортизаторов. Прочность обусловлена напряжениями сдвига в пружинах. Так как жесткость пружины зависит от диаметра ее проволоки и от него же зависят напряжения сдвига, то допустимая жесткость выражена через допустимое напряжение сдвига.

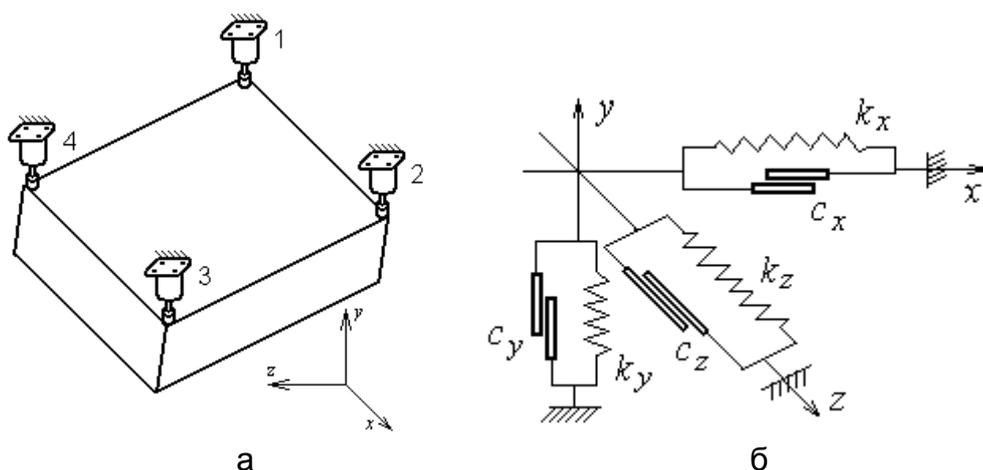


Рис. 2. Схема амортизационной подвески БКВ (а) и расчётная схема амортизатора (б)

Подвеска состоит из четырех опор, прикрепленных к агрегату шарнирно. Каждая опора моделируется тремя линейно-упругими пружинами и тремя демпферами, расположенными вдоль координатных осей. Масса подвески,

являющаяся функцией цели, складывается из массы m_y упругих и массы m_d демпфирующих элементов.

Упругий элемент обычно выполняют в виде пружины. Жесткость ее пропорциональна величине d^4 и обратно пропорциональна R^3 , где d – диаметр проволоки, а R – радиус пружины. Масса пружины пропорциональна произведению d^2R . Считая, что при варьировании размеров пружины отношение d/R постоянно, получим, что масса пружины

$$m_y = Ak^3,$$

где A – некоторый коэффициент.

Коэффициент демпфирования пропорционален площади сечения демпфера r^2 , где r – радиус корпуса. Предполагая, что при варьировании размеров демпфера их отношения остаются постоянными, получим, что масса демпфера пропорциональна r^3 . Тогда находим

$$m_d = Bc^{3/2},$$

где B – некоторый коэффициент.

Наличие быстровращающегося ротора в БКВ требует минимизации перегрузки G , которую испытывает блок, чтобы сохранять его работоспособность.

3. Оптимизация параметров подвески

Задача анализа – установить зависимости между параметрами объекта для задачи синтеза, решение которой даёт наиболее рациональные соотношения этих параметров, обеспечивающих выполнение необходимых критериев. В данном случае для определения перегрузок БКВ и усилий в связях необходимо проинтегрировать уравнения его движения.

Так как при колебаниях БКВ на опорах их угловые перемещения малы, используем уравнения движения, не учитывающие повороты тела [9]. Правая часть этой системы уравнений может быть вектором, состоящим из синусоидальных составляющих с одинаковой частотой в случае установившейся вибрации планера, ограниченной во времени функцией при внезапных и ударных воздействиях или произвольной функцией при переходных процессах нагружения.

В результате решения задачи анализа находим перегрузки G в каждой из опасных точек и сравниваем их с допустимым значением $[G]$. Остальные ограничения назначаем из конструктивных соображений и условий стандарта.

Перемещения БКВ при колебательном движении ограничены размерами ниши, в которой он установлен, максимальным ходом штока амортизатора и допустимыми перемещениями фланцев компенсаторов, соединяющих агрегат с трубопроводами. В наших расчетах принято ограничение перемещений вдоль продольной оси самолета $[s_x] = 8 \text{ мм}$, допустимые перемещения вдоль вертикальной и поперечной осей $[s_y] = [s_z] = 5 \text{ мм}$, допустимые углы поворота вокруг этих осей $[\varphi] = 0,02 \text{ рад}$, $[\psi] = [\theta] = 0,04 \text{ рад}$.

Для расчета приняты $A = 0,8 \cdot 10^{-17} \text{ с}^6/\text{кг}^2$, $B = 0,1 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{3/2}/\text{кг}^{1/2}$, которые выбраны на основании статического расчета пружин под воздействием инерционных сил при исходной величине перегрузки, $[G] = 2$ и характеристики структурного состава подвески, которые записаны в первой строке таблицы.

Результаты оптимизации параметров амортизационной подвески

X	$k_x/10^6$	$k_y/10^6$	$k_z/10^6$	$\beta/10^{-2}$	a_1	a_2	a_3	a_4	$m, \text{кг}$	N
X_0	0,134	0,134	0,134	0,417	5,00	3,00	4,00	2,00	27,84	2,28
X_K	0,027	0,290	0,041	0,204	2,96	2,50	2,74	2,08	14,00	1,48
X_{II}	0,055	0,238	0,066	0,299	3,99	3,43	3,23	1,82	16,08	1,60
X_{Σ}	0,070	0,261	0,067	0,348	3,57	2,59	3,07	2,14	14,00	1,53

Начальный вектор параметров X_0 состоит из величин коэффициентов жесткости k_x , k_y , k_z , отношения коэффициента демпфирования к коэффициенту жесткости β , относительных величин a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , характеризующих структурный состав подвески блока. Предполагается, что в зависимости от распределения масс в объекте, усилия и соответственно параметры амортизаторов в каждом узле могут быть различными. Эти величины есть отношения коэффициента жесткости амортизатора в соответствующем узле к некоторому его фиксированному значению.

Вибрация планера самолета, от которой следует защитить агрегат, задана в виде спектра перегрузок. На интервале частот от 1 Гц до 22 Гц виброперегрузки постоянны и равны 1, на интервале от 22 Гц до 60 Гц они линейно возрастают от 1 до 7 и далее до наибольшей частоты, равной 2000 Гц, они остаются равными 7.

Процесс оптимизации в целом построен как поочередная последовательность решений задач минимизации массы m и перегрузки G . Для указанного в таблице вектора X_0 первый этап оптимизации осуществлялся без учета перегрузки G , он привел к вектору X_1 . Следующий этап оптимизации проводится с минимизацией перегрузки G , но без ограничения массы m , в результате чего получен вектор X_2 . Процесс оптимизации повторяют дальше, чередуя функции цели m и G на каждом новом этапе. Отметим, что процесс оптимизации на этапах, где функцией цели была масса, ограничивался такой допустимой перегрузкой, которая достигалась как ее минимум в предыдущих этапах, когда функцией цели была перегрузка.

В результате проведенной оптимизации уменьшена масса элементов подвески и воздействующие на подвешенный агрегат перегрузки. Определены пределы, до которых может быть уменьшена масса и перегрузка. В рассматриваемой конструкции при снятии ограничений на перегрузку суммарную массу можно довести до 3,96 кг. При исследовании влияния на процесс поиска экстремума различных ограничений (геометрических параметров, усилий в амортизаторах и т.д.) установлено, что активным ограничением является перемещение агрегата s_x . По этому критерию процесс оптимизации приходит на границу области допустимых решений и далее

движется вдоль этой границы. По остальным параметрам процесс оптимизации не выходит к границе области решений.

При защите БКВ от кратковременного воздействия получены аналогичные результаты. Активными ограничениями являются перемещение s_x и перегрузка агрегата. Поверочный расчет перед оптимизацией показал, что исходная конструкция подвески не обеспечивает защиту от удара. Первое значение массы в допустимой области было 27,84 кг. Попеременно оптимизируя массу и перегрузку, получили конструкцию массой 14,00 кг. Параметры задачи в конце оптимизации приведены в таблице (вектор X_K).

Поскольку эффективно минимизировать массу удастся только при совместной минимизации перегрузки – параметра, на границу которого выходит процесс поиска решения задачи, то естественно использовать многокритериальную оптимизацию, в данном случае – одновременно оптимизировать массу и перегрузку. Были проведены расчеты с двумя вариантами функции цели. Первый:

$$\Psi_{\Pi} = m \cdot G,$$

Второй –

$$\Psi_{\Sigma} = m/m_0 + G,$$

где m_0 – начальное значение массы амортизаторов. Деление необходимо для того, чтобы сделать оба слагаемых безразмерными.

Результаты оптимизации приведены в таблице соответственно в векторах X_{Π} и X_{Σ} . При использовании в качестве функции цели произведения m и G масса подвески агрегата уменьшена до 16,08 кг. Когда функцией цели была сумма m и G , получена масса подвески 14,00 кг. Таким образом, удалось определить оптимальный по Парето [10] вектор параметров, при котором дальнейшее улучшение одного из критериев может привести только к ухудшению другого. Масса снижена по сравнению с исходной массой на 8,4 %, а перегрузка – на 25 %, что свидетельствует о значительном запасе, заложенном в существующей конструкции.

Заключение

Эффективность процесса минимизации какого-либо критерия, например массы, увеличивается, если в качестве критерия оптимальности поочередно использовать и те параметры, на границы которых выходит процесс поиска минимума. Тот факт, что при различных записях функции цели получаются близкие результаты, позволяет сделать вывод, о том что в области решений имеется единственный минимум, которому соответствует вычисленный оптимальный вектор. Различие оптимальных векторов для кратковременной нагрузки и для установившейся вибрации планера показывает, что нельзя получить эффективную защиту от всех кинематических воздействий только с помощью линейных амортизаторов. Поэтому в реальных конструкциях следует применять комбинированные амортизаторы с полимерными вставками.

Список литературы

1. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы). Требования, нормы и методы испытаний. – М.: АРМАК, 2004. – 324 с.
2. Динамика конструкций при воздействии кратковременных нагрузок / С. С. Кохманюк, А. С. Дмитриев, Г. А. Шелудько и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 304 с.
3. Баландин, Д. В. Математическое моделирование и оптимизация противоударных систем / Д. В. Баландин // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер.: Механика. 2001. № 1. – С. 52–54.
4. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. – М.: Наука, 1980. – 520 с.
5. Батищев, Д. Е. Поисковые методы оптимального проектирования / Д. Е. Батищев. – М.: Сов. радио, 1975. – 216 с.
6. Филипковский, С. В. Эффективность некоторых методов оптимизации упруго-демпферных подвесок агрегатов / С. В. Филипковский // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2007. – №. 38. – С. 159–168.
7. Стрельникова, Е. А. Гибридизация вычислительных процессов: в 2-х ч. Ч. 2. / Е. А. Стрельникова, Г. А. Шелудько. – Харьков: Новое слово, 2007. – 130 с.
8. Шелудько, Г. А. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. 1. Поисковые методы / Г. А. Шелудько, Е. А. Стрельникова, Б. Я. Кантор. – Харьков: Новое слово, 2008. – 188 с.
9. Ганиев, Ф. Р. Колебания твердых тел / Ф. Р. Ганиев, В. О. Кононенко. – М.: Наука, 1976. – 432 с.
10. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б. А. Березовский, Ю. М. Барышников, В. И. Борзенко и др. – М.: Наука, 1989. – 128 с.

References

1. Kvalifikacionnye trebovanija KT-160D. Uslovija jekspluatacii i okruzhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija (Vneshnie vozdejstvujushhie faktory). Trebovanija, normy i metody ispytanij. [Qualification requirements CT-160D. Operating conditions and environment for onboard aviation equipment (External influencing factors). Requirements, standards and test methods.] M.: ARMAK, 2004. 324 p.
2. Dinamika konstrukcij pri vozdejstvii kratkovremennyh nagruzok [The dynamics of structures under the short-term loads action] / S. S. Kohmanjuk et al. Kiev: Nauk. dumka, 1989. 304 p.
3. Balandin D. V. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija protivoudarnyh sistem [Mathematical modeling and optimization of shock systems] // Vestn. Nizhegorod. un-ta. Ser.: Mehanika. 2001. No 1. P. 52–54.
4. Vasil'ev F. P. Chislennye metody reshenija jekstremal'nyh zadach [Numerical methods for solving extremal problems]. M.: Nauka, 1980. 520 p.
5. Batishev D. E. Poiskovyje metody optimal'nogo proektirovanija [Search methods for optimal design]. M.: Sov. radio, 1975. 216 p.
6. Filipkovskij S. V. Jefferktivnost' nekotoryh metodov optimizacii uprugodempfernyh podvesok agregatov [Efficiency of some optimization methods for elastic-damping suspensions of aggregates] // Vesn. Nac. tehn. un-ta «HPI». Har'kov, 2007. Vip. 38: P. 159–168.

7. Strel'nikova E. A., Shelud'ko G. A. Gibridizacija vychislitel'nyh processov [Hybridization of computational processes]. V 2-h ch. Ch. 2. Har'kov : Novoe slovo, 2007. 130 p.

8. Shelud'ko G. A., Strel'nikova E. A., Kantor B. Ja. Gibridnye metody v zadachah optimal'nogo proektirovanija. 1. Poiskovyje metody [Hybrid methods in optimal design problems. 1. Search methods]. Har'kov : Novoe slovo, 2008. 188 p.

9. Ganiev F. R., Kononenko V. O. Kolebanija tverdyh tel [Fluctuations of solids]. M. : Nauka, 1976. 432 p.

10. Mnogokriterial'naja optimizacija. Matematicheskie aspekty [Multi-criteria optimization. Mathematical aspects]. / B. A. Berezovskij et al. M. : Nauka, 1989. 128 p.

Поступила в редакцию 16.03.2019, рассмотрена на редколлегии 18.03.2019.

Оптимізація пружно-демпферних підвісок обладнання системи кондиціонування повітря літака

Проектування захисту від перевантажень обладнання в блоці кондиціонування повітря літака потребує використання досить ефективних методів аналізу вібраційних характеристик підвіски, а також розроблення відповідного специфіці задачі методу оптимального синтезу. Для розв'язання задачі застосовано гібридний адаптивний метод оптимізації. Об'єктом оптимізації є конструкція підвіски блока кондиціонування повітря з несиметричним розподілом мас і розташуванням в'язей. В'язями є вузли кріплення у вигляді амортизаторів і сильфони для стикування з трубами. Блок вважаємо твердим тілом. В'язі виділимо як елементи, що оптимізуються.

Метою роботи є удосконалення методу оптимізації параметрів амортизаторів, які забезпечують захист від вібрації і ударних експлуатаційних навантажень.

У пропонованому методі оптимізації використано ряд методів, які названо гібридентами. Задається критерій, за яким вибирають найбільш ефективні гібриденти. В цей критерій входить інформація, яка характеризує мінливу ситуацію; а саме ознаки структури і метричних властивостей простору, де здійснюється пошук; передісторія обчислювального процесу, за якою встановлюється можливе продовження; природа системи функцій, які визначають розв'язувану задачу. Введено адаптивне управління, яке здійснює отримання векторів рішень, напрямків пошуку і пошукових кроків відповідно ситуації, що змінюється. Оскільки ефективно мінімізувати масу вдається тільки при спільній мінімізації перевантаження – параметра, на межу якого виходить процес пошуку розв'язку задачі, то природно використовувати багатокритеріальну оптимізацію. В даному випадку – одночасно оптимізувати масу і перевантаження. Обмеження накладають на конструктивні розміри і міцність амортизаторів. У результаті проведеної оптимізації зменшено масу елементів підвіски і перевантаження, яке діє на підвішений блок. Визначено межі, до яких може бути зменшено масу і перевантаження.

Ключові слова: блок кондиціонування повітря, амортизаційна підвіска, маса, перевантаження, оптимізація, гібридний адаптивний метод

Optimization of the spring-damping suspensions of the equipment of the air conditioning system of the aircraft

The design of equipment overload protection in an aircraft air-conditioning unit requires the use of sufficiently effective methods for analyzing the vibration

characteristics of the suspension, as well as the development of an appropriate synthesis method for the specific task. To solve the problem applied the adaptive hybrid optimization method. The object of optimization is the design of the suspension of the air conditioning unit with an asymmetrical distribution of masses and arrangement of joints. Joints are the attachment points in the form of shock absorbers and bellows for joining with pipes. Block is considered solid. Links will be highlighted as optimized elements.

The aim of the work is to improve the method of optimizing the parameters of shock absorbers, which provide protection from vibration and operating shock loads.

The proposed optimization method uses a number of methods that are called hybridents. Sets the criterion by which the most effective hybridents are selected. This criterion includes information that characterizes a changing situation; namely, signs of the structure and metric parameters of the space where the search is carried out; the prehistory of the computational process by which the possible continuation is established; the nature of the system of functions that determine the problem being solved. Adaptive control is introduced, which carries out the getting of decision vectors, search directions and search steps, respectively, the changing situation. Since it is possible to effectively minimize mass only with joint minimization of overload which is the parameter, to the boundary of which the solution search process goes, it is natural to use multi-criteria optimization. In this case, it is at the same time optimizing mass and overload. Restrictions are imposed on the structural dimensions and strength of the shock absorbers. As a result of the optimization, the weight of the suspension elements and the overload acting on the suspended block are reduced. The limits to which mass and overload can be reduced are determined.

Keywords: air-conditioning unit, shock-proof suspension, mass, g-load, optimization, hybrid adaptive method

Сведения об авторах:

Филипковский Сергей Владимирович – к. т. н., с. н. с., доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, sfilipkovskij@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2861-8032.

Павлюченко Виталий Александрович – ведущий конструктор, Государственное предприятие «Антонов», Киев, Украина.

Стрельникова Елена Александровна – д. т. н., проф., вед. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, elena15@gmx.com, ORCID:0000-0003-0707-7214.

About the authors:

Filipkovsky Sergey Vladimirovich – ph. d. tech. sci., senior researcher, Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine, sfilipkovskij@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2861-8032.

Pavlyuchenko Vitaly Alexandrovich – leading designer, Antonov Company, Kiev, Ukraine.

Strelnikova Elena Alexandrovna – dr. tech. sci., prof., leading researcher, A. N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine, elena15@gmx.com, ORCID: 0000-0003-0707-7214.