

УДК 518.5

И. Н. Статников, Г. И. Фирсов**МНОГОУРОВНЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
МАШИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

На примере задачи моделирования и оптимизации резонансного преобразователя рассматривается применение эвристического метода ПЛП-поиска, уже зарекомендовавшего себя положительно по критерию рационального проведения вычислительных экспериментов при анализе и синтезе многопараметрических и многокритериальных систем.

Ключевые слова: многоуровневое планирование эксперимента, ПЛП-поиск, эвристические методы оптимизации, резонансный преобразователь, планирование имитационных экспериментов.

В настоящее время наиболее привлекательными становятся такие методы исследования и решения задач оптимизации, которые требуют минимума априорной информации о решаемой задаче, более того, позволяют по ходу решения получать такую информацию легко и просто. К таким относится метод Монте-Карло и его различные модификации, в основе использования которых лежат принципы случайного поиска решения задачи, что и делает такой подход универсальным. Но платой за такую универсальность является определённая «слепота», и это приводит к громадным объёмам вычислений, тем более что имеет место рост размерности решаемых задач (растёт число фазовых координат и число конструктивных (оптимизируемых) параметров, растёт число критериев качества, характеризующих систему). Как представляется, в значительной степени эту потребность реализует метод планируемого ЛП-поиска (ПЛП-поиска) благодаря синтезу в нём идеи дискретного квазиравномерного по вероятности зондирования J – мерного пространства варьируемых параметров α_j ($j=1, \dots, J$) и методологии планируемого математического эксперимента [4]. Сочетание таких идей в алгоритме ПЛП-поиска позволило, с одной стороны, осуществлять глобальный квазиравномерный просмотр заданной области варь-

Статников Исаак Наумович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник (Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва); e-mail: firsovgi@mail.ru.

Фирсов Георгий Игоревич — старший научный сотрудник (Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва); e-mail: firsovgi@mail.ru.

© Статников И. Н., Фирсов Г. И., 2016

ируемых параметров, а, с другой стороны, применить многие формальные оценки из математической статистики. Одним из условий, повышающих эффективность применения поисковых методов при решении задач оптимального проектирования, является классификация всех параметров по степени их влияния на значения функций цели, т. е. выделение существенных параметров.

Данный выше подход был применён при решении совместно с Я. М. Зархом задачи оптимального проектирования резонансного преобразователя (РП) для судовых валопроводов, используемых в целях изменения (снижения) уровня продольных колебаний механической системы, так как с его помощью можно воздействовать на собственные частоты системы ω_k . Известно [1], что продольные колебания судовых валопроводов часто становятся причиной поломок в двигательных комплексах и повышенной вибрации корпуса судна. Данное обстоятельство связано с постоянным ростом скоростей хода судов, приводящих к увеличению неравномерности потока в диске гребных винтов и повышению переменных составляющих сил упора. Одним из перспективных путей предупреждения резонансных режимов продольных колебаний валопроводов во всём диапазоне их чисел оборотов является использование резонансного преобразователя, представляющего собой поршень и гидравлический цилиндр. Полость цилиндра соединена с дополнительным резервуаром, и оба они заполнены маслом, находящимся под давлением, которое регулируется таким образом, чтобы уравновесить силу упора гребного винта, которая полностью передается на поршень. Таким образом, между валопроводом и корпусом главного упорного подшипника создаётся масляная полость, с помощью которой изменяют упруго-инерционные характеристики всей системы.

Структурная модель системы валопровод – резонансный преобразователь – корпус судна, согласно [2], представлена на рисунке, где гребной винт моделируется массой m_0 , к которой приложена сила активного сопротивления с коэффициентом сопротивления h_0 , учитывающим потери как непосредственно на винте, так и на валопроводе; валопровод представлен протяжённым весомым стержнем с параметрами m_{0l} , l , S_{0l} , C_{0l} , соответствующими массе, длине, площади поперечного сечения и продольной жёсткости реального валопровода; главный упорный подшипник (ГУП) задаётся его импедансом $Z_3 = h_3 + i\psi$, учитывающим полное сопротивление как собственно ГУП, так и корпуса судна; резонансный преобразователь показан как гидросистема, имеющая суммарную площадь плунжеров S_{Π} , ёмкость полости внутри ГУП V_3 с длиной l_3 , длину и проходное сечение соединительных трубопроводов l_4 и S_4 и ёмкость вынесенного резервуара V_5 с площадью сечения S_{45} и длиной l_5 . Гидросистема заполнена маслом, имеющим плотность ρ и коэффициент динамической вязкости μ .

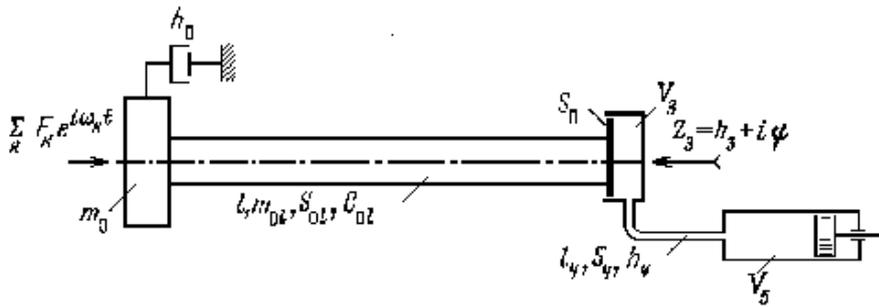


Рис.

Динамическая модель этой системы представлена в работе [2], где выведены математические зависимости между амплитудами колебаний главного упорного подшипника (ГУП), величинами возбуждающих сил, параметрами РП и её собственными частотами. Эти частоты являются корнями уравнения

$$i\omega Z_{\Pi} G_l(\omega) - E S_{0l} \beta G_l'(\omega) = 0,$$

где

$$1/Z_{\Pi} = 1/Z_{\text{РП}} + 1/Z_3,$$

$$G_l = \cos \beta l + a \sin \beta l; G_l' = \sin \beta l - a \cos \beta l; a = \alpha_2 - i \beta_2;$$

$$\alpha_2 = -m_0 \omega^2 / E S_{0l} \beta; \beta_2 = h_0 \omega / E S_{0l} \beta; \beta = \omega \sqrt{m_{0l} / E S_{0l} l};$$

причём $G_l, G_l', E, S_{0l}, \beta, Z_3$ не зависят от параметров РП.

Входной импеданс резонансного преобразователя $Z_{\text{РП}}$ связан с его геометрическими параметрами следующим образом:

$$1/Z_{\text{РП}} = \frac{\alpha_4 \alpha_5 \alpha_6^2 - \omega \alpha_1 \alpha_2 (\omega \rho \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 - \alpha_1^2 G)}{i \alpha_1^2 G (\omega \rho \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 - \alpha_1^2 G)},$$

где $\alpha_1 = S_{\Pi}$ – суммарная площадь плунжеров в системе,

$\alpha_2 = l$ – длина полости внутри ГУП,

$\alpha_3 = l_4$ и $\alpha_6 = S_4$ – длина и проходное сечение соединительных трубопроводов,

$\alpha_4 = S_5$ и $\alpha_5 = l_5$ – площадь сечения и длина вынесенного резервуара,

G – объёмный модуль упругости для жидкости,

ρ – плотность жидкости, заполняющей гидросистему РП.

Расчёт и проектирование РП сводится к выбору его геометрических параметров α_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) при выбранной конструктивной схеме. Каждое такое сочетание параметров определяет степень эффективности

управления резонансными свойствами системы с помощью РП. Количество возможностей такого управления оценивается по величине модуля производных $|d\omega_k/d\alpha_j|$. Чем больше модуль производной, тем эффективнее можно влиять на резонансные свойства системы. Запишем функцию цели как $\Phi_k(\alpha) = \max |d\omega_k/d\alpha_j|$, где $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6)$ – вектор геометрических параметров РП. При решении задачи осуществлялась рандомизация всего процесса поиска оптимальных сочетаний параметров α_j . Таким способом строилась матрица планирования экспериментов (МПЭ), часть которой дана в таблице 1.

Таблица 1

Матрица планирования экспериментов

N	α_j					
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
1	1969	5,28	260,94	496,87	183,91	11,56
2	1781	4,03	148,44	721,88	242,66	7,06
•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••
217	1031	4,97	289,06	440,63	183,91	8,19
218	1781	6,22	176,56	665,62	125,16	3,69

Параметры МПЭ выбраны следующими:

$N = 218$ – общее число всех машинных экспериментов на ЭЦВМ,

$r = 6$ – размерность исходного пространства варьируемых параметров,

$N_1 = 16$ – число уровней, на которые разбивался каждый параметр α_j ,

M_g – число серий экспериментов или число реализаций на каждом

уровне параметра α_j ($g = 1, 2, \dots, N_1$);

общее число экспериментов

$$N = \sum_{g=1}^{N_1} M_g.$$

Область поиска оптимальных сочетаний параметров представляла гиперпараллелепипед, заданный следующей системой параметрических ограничений:

$$970 \leq \alpha_1 \leq 2300; 40 \leq \alpha_2 \leq 515; 10 \leq \alpha_3 \leq 260,$$

$$1,8 \leq \alpha_4 \leq 7,1; 300 \leq \alpha_5 \leq 1200; 1,5 \leq \alpha_6 \leq 22.$$

После всех машинных экспериментов каждый параметр α_j (фактор), в том числе и все парные произведения, был подвергнут дисперсионному анализу с целью определения его статистической значимости [3]. При этом подсчитывается среднее значение $\bar{\Phi}(\alpha)$ для всей совокупности экспериментов

$$\tilde{\Phi}(\alpha) = \frac{1}{N} \left| \sum_{g=1}^{M_1} \sum_{h=1}^{M_g} \Phi_{gh}(\alpha) \right|.$$

Для каждого фактора α_j подсчитываются средние значения $\tilde{\Phi}_g$ на каждом g -м уровне, вычисляются оценки дисперсий между уровнями и внутри них. По полученным оценкам дисперсий рассчитывается критерий статистической значимости Фишера F . Найденное значение сопоставляется с теоретическим критерием F_T из табл. XVIII работы [3] при соответствующих степенях свободы $\nu_1 = N_1$ и $\nu_2 = N - N_1$ и 5 % уровне значимости критерия F .

Для проведения подобного анализа над 15 парными сочетаниями факторов ($C_6^2 = 15$) в каждом эксперименте подсчитываются значения всех произведений типа $\alpha_i \alpha_j$, где $i \neq j$. Затем полученные значения для каждого типа произведения при $i = \text{const}$ и $j = \text{const}$ группируются в интервалы так, чтобы в каждом интервале $M_g \geq 10$. В дальнейшем каждый тип парного сочетания подвергался дисперсионному анализу. По результатам анализа выявлены статистически значимые линейные и парные эффекты отдельных факторов и их парных сочетаний (табл. 2) при уровне значимости $P = 0,05$.

Таблица 2

Эффекты линейных и парных взаимодействий

Фактор	ν_1	ν_2	F	F_T
α_5	15	202	33,46	1,70
α_4	15	202	1,87	1,70
$\alpha_2 \alpha_5$	9	208	29,83	1,89
$\alpha_1 \alpha_5$	12	205	29,40	1,78
$\alpha_4 \alpha_5$	10	207	19,20	1,89
$\alpha_5 \alpha_6$	11	206	17,90	1,80
$\alpha_3 \alpha_5$	11	206	9,00	1,80

По результатам дисперсионного анализа и данным МПЭ, пользуясь, например, методом наименьших квадратов, можно построить корреляционную зависимость $\tilde{\Phi}(\alpha)$ в виде полинома, содержащего линейные члены и парные сочетания таблицы 2. Основываясь на результатах таблицы 2, можно также построить функцию, аппроксимирующую поверхность заданной функции цели $\Phi(\alpha)$. В этом случае построенная зависимость будет носить более простой и достоверный характер по сравнению с аналогичным выражением, построенным для исходной размерности пространства исследуемых параметров, по следующим причинам:

- 1) размерность пространства поиска значительно сокращена (например, в данной задаче от $r = 6$ можно перейти к $r = 2$);
- 2) учитываются наиболее существенные парные взаимодействия типа $\alpha_i \alpha_j$;

3) с учётом первой и второй причин аппроксимация будет производиться на более «гладких» участках поверхности функции цели.

Для дальнейшего поиска сочетаний параметров, дающих максимальное значение $\Phi(\alpha)$, применялся следующий приём. На основании критерия Дункана [5] выявлены наиболее существенные в статистическом смысле интервалы у всех парных сочетаний из таблицы 2 и составлена система неравенств

$$\begin{aligned} 48 \leq \alpha_2 \alpha_5 \leq 333, \quad 23042 \leq \alpha_1 \alpha_5 \leq 130030, \\ 7331 \leq \alpha_4 \alpha_5 \leq 61562, \quad 57 \leq \alpha_5 \alpha_6 \leq 1154, \quad 1431 \leq \alpha_3 \alpha_5 \leq 27317. \end{aligned} \quad (1)$$

Далее были проведены три серии экспериментов. Усреднённые результаты приведены в таблице 3. В серии 1 был выбран набор постоянных значений параметров $\alpha_1 = 1406,25$, $\alpha_2 = 3,41$, $\alpha_3 = 401,53$, $\alpha_4 = 360$ и $\alpha_6 = 4,81$. С учётом системы неравенств (1) назначен диапазон варьирования $22 \leq \alpha_5 \leq 100$. При этом были несколько завышены верхние границы неравенств у $\alpha_1 \alpha_5$ и $\alpha_3 \alpha_5$. Затем применили одномерный ЛП-поиск по α_5 . В серии 2 оставлен тот же набор постоянных значений α_1 , α_2 , α_3 и α_6 . С учётом системы (1) область поиска максимальных значений $\Phi(\alpha)$ по α_4 и α_5 , определялась следующими диапазонами их варьирования:

$$905 \leq \alpha_4 \leq 1060; \quad 21 \leq \alpha_5 \leq 58.$$

Таблица 3

Оценки средних значений функции цели

N	Среднее значение функции цели $\tilde{\Phi}(\bar{\alpha})$			
	ЛП-поиск в исходной области	Планирование экспериментов		
		1-я серия	2-я серия	3-я серия
16	2,70	4,51	8,82	7,22
32	2,27	4,56	9,07	7,80

При этом соблюдались все неравенства в системе (1). Применялся ЛП-поиск в области (α_4, α_5) . В серии 3 был выбран другой произвольный набор постоянных значений параметров $\alpha_1 = 1346,75$, $\alpha_2 = 5,59$, $\alpha_3 = 457,81$ и $\alpha_6 = 2,56$. Область поиска на плоскости (α_4, α_5) оставлена та же, что и во второй серии. Кроме трёх серий, поиск оптимального набора параметров производился в исходной области, заданной системой неравенств (5). Усреднённые результаты также показаны в таблице 3. В этой же исходной области поиска проведено 200 машинных экспериментов. При этом получено $\tilde{\Phi}(\alpha) = 2,62$, что несущественно отличалось от среднего значения этой функции, полученного при планировании экспериментов. Данные таблицы 3 показывают, сколь значительно повышается эффективность дальнейшего применения поисковых методов, если на начальном этапе решения задачи проектирования использовать описанный

приём определения существенных и несущественных параметров. В частности, в результате использования предварительно спланированных экспериментов удалось существенно снизить размерность пространства поиска оптимальных решений при одновременном отыскании в среднем более высоких значений функции цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин М. Д., Тайчер С. Я. К вопросу о возможности снижения уровня продольных резонансных колебаний судовых валопроводов // Виброакустическая активность механизмов с зубчатыми передачами. М.: Наука, 1971. С. 136–145.
2. Глазов Ю. Е., Зарх Я. М., Тайчер С. Я. Методы подбора параметров резонансного преобразователя для судовых валопроводов // Акустическая динамика машин и конструкций. М.: Наука, 1973. С. 96–101.
3. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
4. Статников И. Н., Фирсов Г. И. Планирование вычислительных экспериментов в задачах моделирования динамических систем машин // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: сборник материалов Всероссийской заочной научно-практической конференции, Биробиджан, 25 декабря 2014 г. Биробиджан: ИЦ ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2015. С. 195–201.
5. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1967. 408 с.

* * *

Statnikov Isak N., Firsov Georgy I.
MULTI-LEVEL PLANNING OF MACHINE EXPERIMENTS
IN THE PROBLEM OF MODELING AND OPTIMIZATION
OF THE RESONANCE CONVERTER

(Blagonravov Engineering Research Institute, Moscow)

The application of a heuristic method of PLP- search, already recommended itself positively on the criterion of rational conducting of computational experiments with analysis and synthesis of multiparametric and multicriterional systems is examined based on the example of the task of simulation and optimization of resonance converter.

Keywords: Multi-level planning of experiments, PLP-search, heuristic methods of optimization, planning of simulation experiments.

REFERENCES

1. Genkin M. D., Taycher S. Ya. On the possibility of reducing the longitudinal resonance vibrations of ship shafting [K voprosu o vozmozhnosti snizheniya urovnya prodol'nykh rezonansnykh kolebaniy sudovykh valoprovodov], *Vibroakusticheskaya aktivnost' mekhanizmov s zubchatymi peredachami* (Acoustic and vibration activity with gear mechanism), Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 136–145.
2. Glazov Yu. E., Zarkh Ya. M., Taycher S. Ya. Metody podbora parametrov rezonansnogo preobrazovatelya dlya sudovykh valoprovodov [Methods of selection of the resonant converter parameters for ship shafting], *Akusticheskaya dinamika mashin i konstruktsiy* (Acoustic dynamics of machines and structures), Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 96–101.

3. Mitropol'skiy A. K. Tekhnika statisticheskikh vychisleniy (Technique statistical calculations), Moscow, Nauka Publ., 1971. 576 p.
4. Statnikov I. N., Firsov G. I. Planirovanie vychislitel'nykh eksperimentov v zadachakh modelirovaniya dinamicheskikh sistem mashin [Planning computing experiments for modeling of dynamic systems of machines], *Matematicheskoe i eksperimental'noe modelirovanie fizicheskikh protsessov: sbornik materialov Vserossiyskoy zaachnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Birobidzhan, 25 dekabrya 2014 g.* (Mathematical and experimental modeling of physical processes: collection of materials All-Russia correspondence scientific-practical conference, Birobidzhan, December 25, 2014) Birobidzhan: ITs PGU im. Sholom-Aleykhema, 2015, pp. 195–201.
5. Khiks Ch. Osnovnye printsipy planirovaniya eksperimenta (The basic principles of experimental design), Moscow, Mir Publ., 1967. 408 p.

* * *