

1. Современные физико-механические методы исследования процесса усталостного разрушения тяжело нагруженных деталей машин// *В. Олейник, М. Г. Стахан, Ю. П. Шигаев и др.*/Надежность и долговечность машин и сооружений: Респ. междувед. сб. науч. тр.—Киев: Наукова думка, 1989.—Вып. 16.—С. 46—55.
2. Стахан М. Г., Мнацаканян А. С., Оганесян Л. Г. Современные методы изучения накопления усталостных повреждений ферромагнитных материалов//Тез. докл. Всесоюз. конф. «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения», г. Киев, 7—8 дек. 1988 г.—Киев, 1988.—С. 10.
3. Стахан М. Г., Шагвед Ю. П., Мнацаканян А. С. Вероятностная оценка периодов усталостного разрушения стальных буровых труб//Хим. машиностроение. Респ. междувед. науч.-тех. сб.—Киев: Техника, 1990.—Вып. 51.—С. 23—28.
4. Стахан М. Г., Оганесян Л. Г., Манукян Г. А. Разработка программных средств для построения оптимальных механических испытаний//Тез. докл. IX Всесоюз. конф. «Планирование и автоматизация экспериментов в научных исследованиях», г. Москва, 25—27 сент. 1989 г.—М.: Изд-во МЭИ, 1989: Ч. 2.—С. 47—48.
5. Степанов М. И. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник.—М.: Машиностроение, 1985.—232 с.

ЕрПН

05. I. 1991

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 4, 1991, с. 163—169

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.833

С. А. ГАСПАРЯН, М. В. АРУТЮНЯН

ОПТИМАЛЬНАЯ РАЗБИВКА ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА

Рассматривается задача оптимизации разбивки общего передаточного отношения многоступенчатого цилиндрического зубчатого редуктора с точки зрения достижения минимума массы привода, состоящего из функционально взаимосвязанных составляющих—приводного электродвигателя и передачи. Численное решение задачи осуществлено усовершенствованным методом Хука-Дживенса, эффективным для достаточно большого числа варьируемых переменных. Проведена вероятностная оценка полученных результатов. На основе проведенных вычислений приведены рекомендации по назначению передаточных отношений редуктора по ступеням.

Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Դիտարկվում է բազմաստիճան զլանկան աստիճանավոր ռեդուկտորի ընդհանուր փոխանցման հարարերության տրոհման լավարկման խնդիրը ֆունկցիոնալ փոխակապեցված բաղադրիչներից՝ էլեկտրաշարժիչի ու փոխանցումներից կազմված շարժարների նվազագույն զանգվածի հասնելու տեսանկյունից: Խնդրի թվային լուծումն իրականացված է բավական մեծ թվով փոփոխականների դեպքում զործուն շուկի-Ջիվենսի կատարելագործված մեթոդով: Կատարված (ստացված) արդյունքների հավանականային դնահատում և հաշվարկների հիման վրա բերված են ռեդուկտորի ըստ աստիճանների փոխանցման հարարերությունների նշանակման հանձնարարականներ:

При конструировании многоступенчатых цилиндрических редукторов возникает задача оптимального подбора передаточных отношений u_i ($i = 1, 2, \dots, m$), причем $\prod_{i=1}^m u_i = u_0$. В [1, 2] эта задача рас-

смотрена для зубчатых передач, состоящих, в основном, из двух ступеней, а также без учета приводного электродвигателя. С учетом того, что в машиностроении и приборостроении усиливаются тенденции по увеличению числа ступеней редуктора и расширению диапазона их передаточных отношений, вопрос оптимального подбора u_i многоступенчатых редукторов является актуальным.

Целью работы является достижение оптимальной разбивки общего передаточного отношения u_0 многоступенчатого цилиндрического редуктора с точки зрения получения минимума массы для привода, состоящего из функционально взаимосвязанных составляющих — приводного электродвигателя и редуктора.

Задача минимизации массы привода $G_{пр}$ состоит в достижении

$$G_{пр} = G_A + G_p \rightarrow G_{пр. min} \quad (1)$$

при варьировании числа ступеней m (от 1 до 6) и величин передаточных отношений u_i (от 1 до 10). В (1): G_A , G_p — массы двигателя и редуктора, определяемые, соответственно из [3, 4] по

$$G_A = k_A \frac{P}{n_{тнх} u_0} = k_A \frac{T_{тнх}}{u_0},$$

$$G_p = \frac{0,0122 T_{тнх}}{[k_0]} \sum_{i=1}^m \frac{(u_i + 1) (k_{31i} + u_i^2 k_{32i})}{u_i^2 \prod_{j=1}^{i-1} u_j},$$

где P — мощность на валу двигателя; n , $n_{тнх}$ — соответственно частоты вращения на входе и выходе привода; $T_{тнх} = P/n_{тнх}$ — вращающий момент на выходном конце вала; k_A — конструктивный коэффициент; $[k_0]$ — допустимое значение комплексного коэффициента контактных напряжений; k_{31i} , k_{32i} — коэффициенты заполнения шестерен и колес соответствующих ступеней. Отметим, что принята обычная нумерация ступеней — со стороны выходного конца привода.

Произведенная оценка влияния на результаты по оптимальному распределению u_i наличия в общей массе $G_{пр}$ составляющей массы корпуса G_K показала малозначимость последней.

Численное решение описанной задачи осуществлено методом Хука-Джигвса, который относится к методу штрафных функций и является наиболее распространенным для решения подобных задач [4]. Программа записана на языке Фортран-V и решена на ЦВМ типа СМ-2 в системе ОСРВ. По предложенной программе рассчитаны оптимальные массы приводов с асинхронными электродвигателями серии 4А мощностью от 0,75 до 55 кВт с разными частотами вращения

при $u_0 = 1,2-500$ и $m \leq 6$. Приведем некоторые результаты проведенных расчетов для объекта мощностью $0,75 \text{ кВт}$, $n = 1000 \text{ об/мин}$, $u_0 = 100$:

для $m = 2 - u_1 = 10, u_2 = 10, G_{\text{пр}} = 53,4 \text{ кг}$;

для $m = 3 - u_1 = 4,67, u_2 = 4,65, u_3 = 4,6, G_{\text{пр}} = 39,1 \text{ кг}$;

для $m = 4 - u_1 = 2,8, u_2 = 3,6, u_3 = 3,2, u_4 = 3,1, G_{\text{пр}} = 36,7 \text{ кг}$;

для $m = 5 - u_1 = 2,56, u_2 = 2,5, u_3 = 2,5, u_4 = 2,5, u_5 = 2,5, G_{\text{пр}} = 36,8 \text{ кг}$;

для $m = 6 - u_1 = 2,13, u_2 = 2,1, u_3 = 2,1, u_4 = 2,2, u_5 = 2,2, u_6 = 2,2, G_{\text{пр}} = 38,2 \text{ кг}$.

Для данного варианта расчета $G_{\text{пр, min}} = 37,7 \text{ кг}$ имеет место при следующей разбивке передаточных отношений: $m = 4, u_1 = 2,8, u_2 = 3,6, u_3 = 3,2, u_4 = 3,1$.

Как видно, разбивка общего передаточного отношения при всех числах ступеней производится таким образом, что отдельные передаточные отношения максимально приближены друг к другу. Эта тенденция усиливается по мере приближения к оптимальному по массе варианту. Результаты вычислений u_i в диапазоне $u_0 = 10-300$ и $T_{\text{max}} = 24-30000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ для всех рассчитанных мощностей сгруппированы в табл. 1 и 2. Рассмотрение показывает, что неравномерность распределения u_i , вызываемая увеличением нагрузки T_{max} , ослабевает по мере возрастания m и u_0 . Практически для всех случаев высоких уровней u_0 , не считая отдельных всплесков, величины u_i распределяются относительно равномерно. На рис. 1 представлены распределения значений передаточных отношений u_0 по ступеням для двух крайних уровней вращающего момента и при разных значениях величины u_0 . Из рис. 1 видно, что при малых нагрузках значение u_i по ступеням равномерно распределено—по мере увеличения нагрузки наблюдается сходный характер распределения u_i с некоторым увеличением для второй ступени и с дальнейшим выравниванием по остальным ступеням. Для выявления влияния равномерности распределения u_i на изменение оптимальной массы редуктора было осуществлено принудительное выравнивание u_i . Результаты вычисленных значений оптимальных масс при естественном (II) и принудительном (I) распределениях u_i и разность масс редукторов G_{min} ($\Delta G, \%$) приведены в табл. 3 для объекта мощностью 4 кВт , $n = 1500 \text{ об/мин}$. Из табл. 3 видно, что наибольшая разница ΔG , имеющая место для двухступенчатого редуктора, тем не менее не превосходит 4% . Таким образом, приведенное рассмотрение показывает, что назначение величины передаточного отношения ступени, соответствующей $G_{\text{пр, min}}$ можно производить по выражению

$$u_i = \sqrt[m]{u_0} \quad (2)$$

Для случая больших нагрузок более точными будут назначения: для $i = 1 - u_1 = 0,8 \sqrt[m]{u_0}$; для $i = 2 - u_2 = 1,2 \sqrt[m]{u_1}$; для последующих ступеней — по (2).

Таблица 1

$T_{\text{гнх}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$u_0 = 10$		$u_0 = 20$		
	u_1	u_2	u_1	u_2	u_3
24 · 250	3,23	3,10	3,12	3,10	3,10
250 · 500	2,44	4,08	3,12	3,10	3,10
500 · 750	2,43	4,06	2,41	4,01	3,11
750 · 1000	2,42	4,11	2,39	4,04	3,10
1000 · 1500	2,41	4,14	2,29	3,49	3,75
1500 · 5000	2,41	4,14	2,26	3,44	3,85

Таблица

$T_{\text{гнх}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$u_0 = 50$				$u_0 = 200$				
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
250 · 500	2,64	2,60	2,70	2,70					
500 · 1000	2,64	2,60	2,70	2,70					
1000 · 2000	2,29	3,57	2,45	2,50	2,83	2,90	2,90	2,90	2,90
2000 · 5000	2,29	3,57	2,45	2,50					
5000 · 10000	2,39	3,36	2,22	2,80					
10000 · 15000	2,25	3,32	2,17	2,70					
15000 · 30000	2,47	2,88	2,62	2,67	2,33	3,52	2,90	2,90	2,90

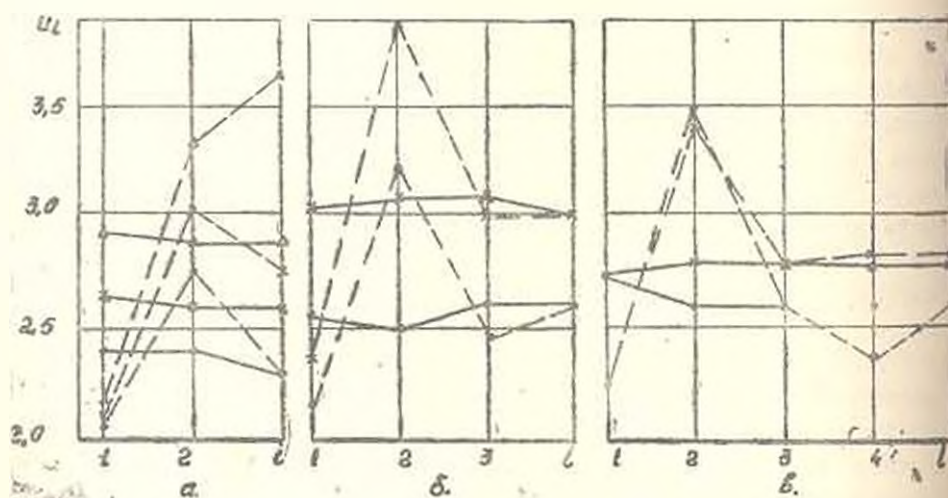


Рис. 1. Зависимость распределения u_i по ступеням для объектов с $T_{\text{гнх}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (—) и $T_{\text{гнх}} = 1030 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (---) при различных уровнях u_0 : а) ● — $u_0 = 15$, x — $u_0 = 20$; б) ● — $u_0 = 50$, x — $u_0 = 100$; в) ● — $u_0 = 150$, x — $u_0 = 200$.

Таблица 3

u_0	Способ расчета	u_1	u_2	u_3	u_4	$G_{\text{р. min.}} \cdot 100$	$\Delta G, \%$
10	I	3,16	3,16	—	—	6,23	3,7
	II	2,41	4,14	—	—	6,46	
30	I	3,06	3,10	3,11	—	20,63	0,8
	II	2,35	4,04	3,16	—	20,80	
50	I	2,68	2,63	2,65	2,68	33,90	2,1
	II	2,35	3,48	2,45	2,50	34,70	
100	I	3,15	3,20	3,20	3,10	68,50	0,5
	II	2,80	3,60	3,20	3,10	68,80	

Вычисленные значения u_i и их распределения имеют стохастический характер, поэтому уместно рассматривать u_i как случайную величину, определяемую на пространстве выборки для генеральной совокупности в пределах ее значений для редуктора с заданным числом ступеней. Рассмотрим выборку, взятую из табл. 1 (для $u_0 = 50$, $m = 4$) с объемом $n = 28$, со средним $\bar{x} = 2,68$ и среднеквадратичным отклонением $\{s = 0,128$. График, построенный на вероятностной бумаге (рис. 2), показывает нормальность распределения величины u_i .

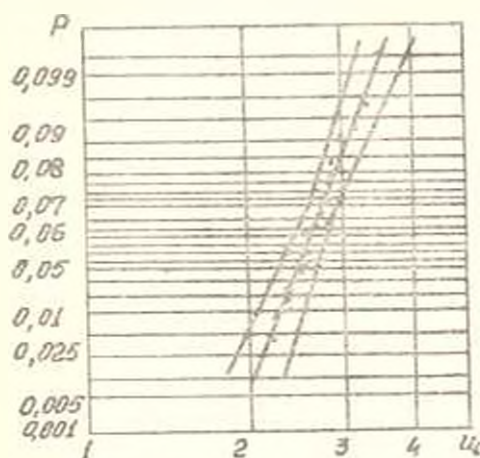


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения величины u_i и ее 5% и 95% доверительные интервалы для выборки $n = 28$.

Нанесенные на график распределения приведенной выборки 5% и 95% доверительные интервалы достаточно узки, что указывает на высокую достоверность нахождения истинного значения u_i в заданном интервале. Принимая за истинное значение неизвестного параметра μ генеральной совокупности выражение, заданное в виде $u_0 = u_i = \sqrt{\mu} = \sqrt{50} = 2,66$, проверим положение среднего значения нормально распределенной величины μ на основании выборки

объема n , т. е. гипотезу $\mu = \mu_0$ посредством использования статистики [5]: $t = |\bar{x} - \mu_0|/s/\sqrt{n}$. Рассчитанное значение величины статистики $t = 0,833$ показывает, что вероятность того, что t отличается от заданного среднего в любую сторону более, чем на t_p при заданном числе степеней свободы $v = n - 1$, равна 0,5, что является значимым. Следовательно, $u_1 = 2,66$ является надежной оценкой среднего для генеральной совокупности.

На рис. 3 приведены теоретические кривые для $i = 2, \dots, 6$ с 90%-ми доверительными областями. Определенная ограниченность доверительных областей подтверждает приемлемость использования выдвинутой закономерности (2).

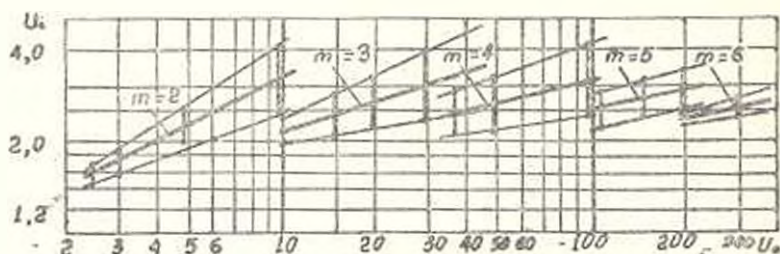


Рис. 3. Теоретические кривые $u_i = f(u_0)$ с 90%-ми доверительными областями для различных уровней числа ступеней.

Приведенные в таблице [6] все значения величины $\varphi = u_i/\sqrt{u_0}$ для двухступенчатых редукторов при $u_0 = 8-50$ и разных критериях оптимизации (равнопрочность, минимальность массы, размеров передач) лежат в интервале 0,7—1,3. Учитывая разнохарактерность принятых в [6] критериев и методов решений, можно считать, что полученные значения φ тесно сгруппированы вокруг среднего их значения $\varphi = 1$, что еще раз подтверждает правомерность предложенного выражения (2).

Таким образом, на основе проведенного анализа для многоступенчатых цилиндрических редукторов передаточные отношения ступеней предлагается назначать по среднестепенному закону (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Курсовое проектирование деталей машин/В. И. Кудрявцев, Ю. А. Церетинский, И. И. Арсенов и др.—Л.: Машиностроение, 1983.—400 с.
2. Носилевич Г. Б. Детали машин.—М.: Машиностроение, 1988.—368 с.
3. Сергеев П. С., Виноградов И. В., Горюхин Ф. А. Проектирование электрических машин.—М.: Энергия, 1969.—632 с.
4. Hooke R., Jervey T. A., Direct search solution of numerical and statistical problems//J. Assn. Mach. — 1961. — № 8. — P. 212—229.
5. Хидсон Д. Статистика для физиков.—М.: Мир, 1970.—296 с.
6. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход.—М.: Мир, 1981.—454 с.