

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.833.7

Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Приймаков Г.А.

НОВЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОНСТРУКТИВНО-УНИФИЦИРОВАННОГО РЯДА СИЛОВЫХ ВОЛНОВЫХ РЕДУКТОРОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ УКРАИНЫ

Введение. Актуальность проблемы.

Силовые волновые зубчатые редуктора (СВЗР) находят широкое применение в промышленности, как в Украине, так и в мировой практике [1-3].

На сегодняшний день в Украине функционирует лишь один государственный стандарт – ГОСТ 23108-78 "Редукторы волновые зубчатые одноступенчатые. Основные параметры" [1], который регламентирует следующие характеристики двухволновых одноступенчатых редукторов: внутренний диаметр гибкого колеса; номинальное передаточное отношение; допускаемый крутящий момент на тихоходном валу; допускаемая радиальная нагрузка на вал; масса. Однако, современные тенденции развития СВЗР в Украине, СНГ и мировой практике [2, 3] показывают, что на смену кинематическим двухволновым схемам приходят силовые трехволновые зубчатые редуктора с металлополимерными гибкими колесами, силовые двухволновые редуктора со сдвоенными и двумя независимыми гибкими колесами и силовые волновые передачи с промежуточными телами качения (ВПШТК).

ГОСТ 23108-78 распространяется же только на одноступенчатые ВЗР общего назначения с крутящими моментами на тихоходном валу от 22,4 Н·м до 6300 Н·м и передаточными отношениями от 80 до 315.

Актуальной представляется проблема создания государственного стандарта по расчету и проектированию СВЗР всех перечисленных выше типов, а для этого необходимо разработать методологию создания и оптимизации конструктивно-унифицированного ряда СВЗР для отраслей машиностроения Украины. Для того, чтобы такая методология была и актуальной, и практически полезной, она должна быть научно обоснованной и оптимизированной.

Цель статьи.

Разработка методологии построения и оптимизации конструктивно-унифицированного ряда СВЗР для создания на ее основе государственного стандарта Украины по конструктивному оформлению всех известных типов СВЗР.

Эконометрические аспекты построения конструктивно-унифицированного ряда СВЗР.

Авторы статьи, проанализировав статистические данные 2000-2010г.г. и, прежде всего, данные НИИ Редуктор (г. Киев) о потребности отраслей машиностроения Украины в редукторах общемашиностроительного назначения, накопили достаточную базу данных об использовании СВЗР с определенными сочетаниями параметров: крутящий момент на тихоходном валу $M_{\text{треб}}$; частота вращения генератора волн $n_{\text{треб}}$; мощность на тихоходном валу $N_{\text{треб}}$; передаточное отношение i .

Полученные результаты исследований потребностей отрасли обобщены в виде гистограмм использования требуемых параметров $M_{\text{треб}}$, $n_{\text{треб}}$, $N_{\text{треб}}$ и $i_{\text{треб}}$, которые при-

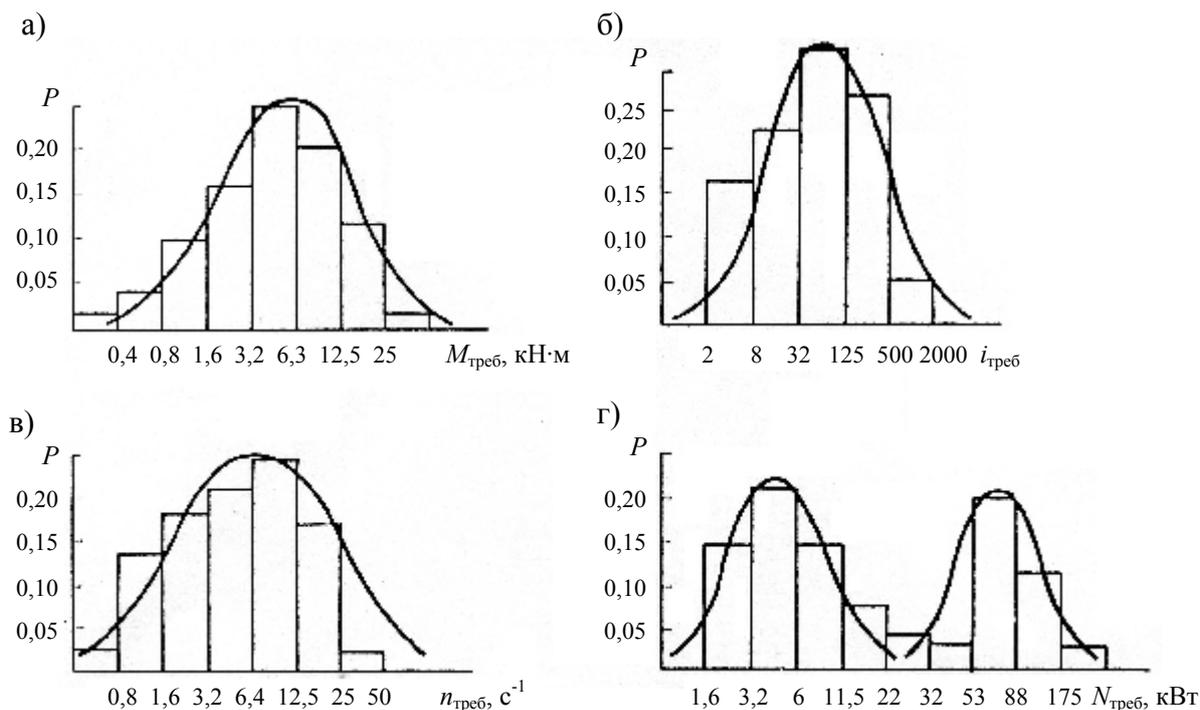


Рисунок 1 – Гистограммы распределения требуемых параметров СВЗР:

а) – крутящего момента; б) – передаточного отношения;

в) – частоты вращения; г) – мощности

ведены на рисунке 1, где P – эмпирическая вероятность проявления величины любого из названных параметров.

Для параметров $M_{\text{треб}}$, $n_{\text{треб}}$ и $i_{\text{треб}}$ гистограммы эмпирического распределения плотности вероятности с хорошей сходимостью по критериям Пирсона и Колмогорова можно заменить теоретическими логнормальными законами распределения. Мощность $N_{\text{треб}}$ имеет большую дисперсию в механизмах привода строительных и дорожных машин и лучше описывается суммой логнормальных законов распределения плотности вероятности.

Чтобы определить требуемую величину выпуска СВЗР с определенными параметрами, достаточно перемножить вероятность появления сочетаний параметров и общий годовой выпуск механизмов.

Согласно типовой методике оптимизации многомерных параметрических рядов [4], для решения оптимизационной задачи необходимо выполнить два условия:

1) зависимость суммарных затрат от программы выпуска должна быть строго возрастающей вогнутой функцией;

2) необходимо выразить одним числом возможность замены одного редуктора другим.

Согласно комбинаторному методу [5, 6] построение ряда СВЗР одного типа должна осуществляться по двум базовым параметрам: диаметру делительной окружности гибкого колеса d_d и передаточному отношению i .

Старый, но не устаревший в Украине и СНГ ГОСТ 2185-66 регламентирует эти же базовые параметры и предусматривает их рост в геометрической прогрессии, что, по мнению авторов, не учитывает плотности потребления СВЗР.

Существует также предложение учесть рост параметров ряда редукторов в виде последовательности чисел Фибоначчи [5], считая такую последовательность самооптимизирующейся, что ставит автора идеи на позиции математического формализма.

Эконометрический метод [7, 8] рационален, но приводит к некоторому многообразию возможных решений с неизбежным уточнением методами динамического программирования (метод "решетки" или задача о брахистохроне). При этом методе затраты на производство $Ц_{\Pi}$ и эксплуатацию $Ц_{\mathcal{E}}$ СВЗР запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Ц_{\Pi} &= C_{\Pi} m_{\Pi} \Pi_{\Pi}; \\ Ц_{\mathcal{E}} &= C_{\mathcal{E}} m_{\mathcal{E}} \Pi_{\mathcal{E}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где C_{Π} , $C_{\mathcal{E}}$ – удельные затраты, грн/кг; m_{Π} , $m_{\mathcal{E}}$ – масса редукторов (с технологической оснасткой); Π_{Π} , $\Pi_{\mathcal{E}}$ – выпускаемое количество.

Если редуктор большого типоразмера заменяет рядом стоящий меньшего типоразмера, то суммарные затраты будут равны:

$$Ц_{n+(n+1)} = C_{n+1} m_{n+1} (\Pi_n + \Pi_{n+1}). \quad (2)$$

Замена считается целесообразной, если выполняется условие

$$Ц_n + Ц_{n+1} > Ц_{n+(n+1)}, \quad (3)$$

и нецелесообразной, если

$$Ц_n + Ц_{n+1} \leq Ц_{n+(n+1)}. \quad (4)$$

Если замена редуктора n на $(n+1)$ оказалась целесообразной, то аналогично определяется целесообразность замены обоих этих редукторов на редуктор $(n+2)$.

Методика поиска варианта ряда, имеющего минимальную стоимость или минимальное число членов, состоит в следующем.

1. Строятся все возможные сочетания редукторов – структуры, которые получаются при заменах одних редукторов другими.

2. Из полученных структур комбинаторикой перебираются все возможные варианты рядов и сопоставляются их показатели – число типоразмеров в ряду и суммарная стоимость затрат по ряду. Программа такой переборки имеется в стандартном пакете MathLab.

Рациональные номенклатуры машиностроительной продукции и ее приводных систем достигается, прежде всего, за счет определения оптимальных рядов этой продукции. Процесс определения оптимальности ряда можно представить как перераспределение параметров и объемов выпуска с целью определения минимума суммарных приведенных затрат z :

$$z = f(K, d_{ai}, R_i), \quad (5)$$

где d_{ai} , R_i – диаметр окружности выступов и серийность i -го члена ряда гибких зубчатых колес СВЗР ($i = 1, 2, \dots, k$).

По методике [7] минимальные приведенные затраты по каждому варианту определяются суммой

$$z = C_j + E_H K_j \rightarrow \min, \quad (6)$$

где C_j , K_j – текущие затраты и капитальные вложения по j -му варианту; E_H – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Капитальные вложения K_j включают капитальные затраты на выпуск и затраты на эксплуатацию. Тогда величина z с учетом (5) находится так:

$$z = \sum_{i=1}^k C_{in} \frac{R_{in}}{(1 + E_{Hn})^t} + E_H \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (S_{in} + Z_{in} \varphi_{ij}) \frac{R_{in}}{(1 + E_{Hn})^t} + QKE_H \rightarrow \min, \quad (7)$$

где R_{in} – программа выпуска СВЗР i -го типоразмера в n -м году, шт; $j = 1, \dots, n$ – число лет выпуска; t – период времени приведения затрат, годы; E_{Hn} – норматив для приведения разновременных затрат; $i = 1, \dots, k$ – число типоразмеров в исходной выборке; S_{in} – капитальные затраты на выпуск СВЗР i -го типоразмера в n -м году, грн; Z_{in} – затраты на эксплуатацию СВЗР i -го типоразмера в n -м году, грн; φ_{ij} – коэффициенты замены; Q – единовременные затраты, грн.

Для определения конструктивных параметров гибких колес СВЗР как комплектующих авторы рекомендуют использовать при оптимизации ряда метод "ветвей и границ" [8, 9].

В целом задача выбора унифицированной конструкции СВЗР является многоуровневой задачей оптимизации параметрических рядов. Если задача формируется в линейном виде, то и решается она методами линейного программирования; в противном случае – методами динамического программирования.

Установлено [2, 6], что связь между ценой СВЗР, его массой и серийностью имеет вид:

$$C = k_{\Pi} \frac{m^a}{N_{\Pi}^b}, \quad (8)$$

где m – масса, кг; N_{Π} – серийность СВЗР, шт; k_{Π} – коэффициент, равный 3,12...5,37 [2]; a, b – показатели степени, $a = 0,825$; $b = 0,3/(\lg N_{\Pi} + 1)$ [2].

В качестве целевой функции метода "ветвей и границ" авторы рекомендуют затраты на эксплуатацию СВЗР, которые можно определить так:

$$Z_{in} = k_{\ominus} \left(\frac{m}{P} \right)^{0,4} N_{\Pi} P^{0,016} \left(4,17 + \frac{1,7}{P - 1,4} \right), \quad (9)$$

где $P = P_{cp} = N_{\Pi}/n + 2$ – средняя повторяемость; n – число потребителей; k_{\ominus} – коэффициент, равный 6,65...9,65 [6].

Анализируя статистические данные (см. рисунок 1) авторы построили нелинейные зависимости $M_{\text{треб}} = f(P)$, $i_{\text{треб}} = f(P)$, $n_{\text{треб}} = f(P)$, $N_{\text{треб}} = f(P)$ и при целевой функции $C(m) \rightarrow \min$ (C – себестоимость) определили область A одновременного оптимального сочетания требуемых параметров СВЗР, выполненных по трехволновой схеме с использованием металлополимерных гибких колес (МГК). Аналогичные области получены и для других конструктивных схем СВЗР.

На рисунке 2 показана область A для трехволновых СВЗР с металлополимерными гибкими колесами в координатах $i_{\text{треб}} - M_{\text{треб}}$, исходя из указанной целевой функции. Параметры $M_{\text{треб}}$ и $N_{\text{треб}}$ при этом легко найти по классическим зависимостям

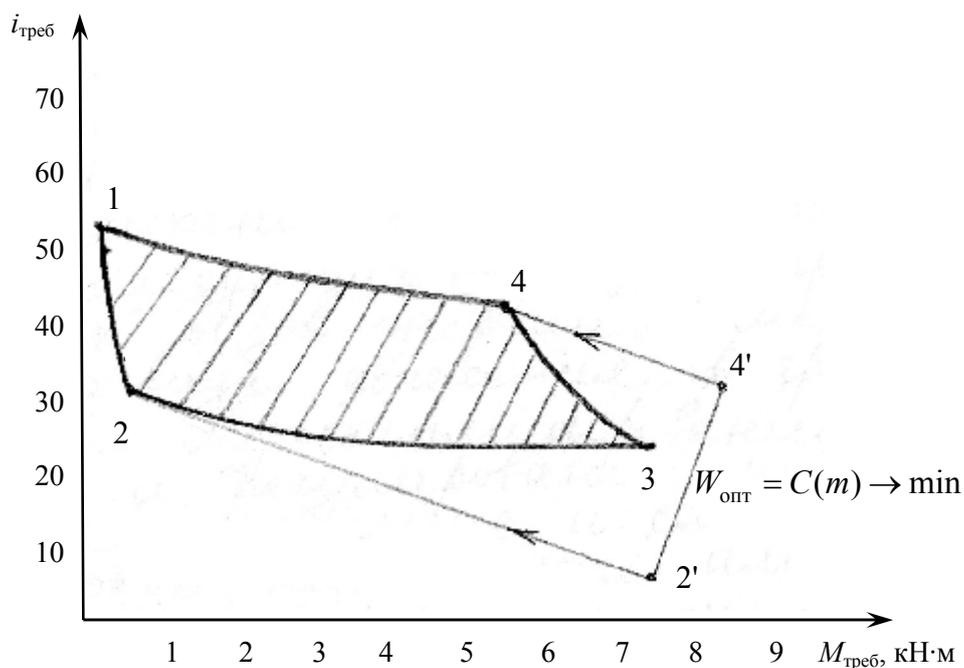


Рисунок 2 – Область A одновременного оптимального сочетания требуемых параметров трехволнового СВЗР с МГК (целевая функция $W_{\text{опт}} = C(m) \rightarrow \min$)

прикладной механики. Данные рисунка 2, несомненно, будут полезны разработчикам нового ГОСТа и проектантам СВЗР.

Математическая модель построения конструктивно-унифицированного ряда СВЗР.

Остановимся теперь на создании и исследовании математической модели построения конструктивно-унифицированного ряда СВЗР с МГК [3].

Исследование возможностей унифицированного использования СВЗР в приводных системах отечественного машиностроения проведено на модели их структуры с использованием теории графов, а уточнение рациональных вариантов – с помощью динамического программирования и теории оптимизации конструкций. Модель структуры механизмов СВЗР должна фиксироваться некоторой математической структурой, способной изоморфно отобразить свойства редуктора, проявляемые в условиях производства и эксплуатации. Сложность математического моделирования СВЗР с целью их унификации заключается в том, что математическая структура должна отобразить не только количественные, но и качественные характеристики волнового привода.

Основные качественные характеристики, учитываемые при унификации, – это те функции, которые выполняют механизмы волнового привода и комплектующие их агрегаты, сборочные единицы и детали. Векторы функций $\{f_{ij}\}$, которые при этом выполняют $\{a_{ij}\}$ элементы структуры механизмов привода разных уровней, состоят из следующих функций: преобразование различных видов энергии в механическую или одного вида движения в другой; редуцирование (или мультиплицирование) параметров движения и регулирование передаточного отношения; разделение и сложение энергетических потоков; изменение направления движения в пространстве и др.

Элементы структуры механизмов привода a_{ij} взаимосвязаны между собой посредством внешних кинематических пар $(W_{a_{ij}})$, помеченных, в свою очередь, трехзначным числом в соответствии с характером подвижностей, допускаемых кинематической парой. Матрица сложности структуры (A) по столбцам и строкам определена вектором, состоящим из номеров всех входящих функционально ориентированных элементов структуры a_{ij} , а по диагонали определена вектором функций $\{f_{ij}\}$, соответствующих этим элементам, [3]:

$$A = \begin{matrix} & a_{m1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{mn} \\ a_{mn} & \left(\begin{matrix} \{f_{m1}\} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \{f_{ij}\} & & \\ & & & \ddots & \\ a_{1n} & (W_a) & & & \{f_{in}\} \end{matrix} \right) & & & & & \end{matrix}, \quad (10)$$

где $i = 1, \dots, m$ – номер конструктивно-компоновочного уровня, к которому могут относиться как детали, так и сборочные единицы, агрегаты, механизмы; $j = 1, \dots, n$ – порядковый номер объекта на произвольном уровне.

В данную матрицу могут быть записаны все типы СВЗР, а также комплектующие их детали и механизмы, известные в научно-производственной практике. Матричное задание структуры СВЗР позволяет:

- находить и унифицировать в механизмах привода элементы структуры одинакового функционального назначения;
- оптимизировать параметры всей структуры методом динамического программирования как дискретной многоуровневой системы;
- находить новые состояния структуры механизмов привода путем объединения, разделения и перестановок ее элементов.

Благодаря указанным свойствам и возможности их реализации на ЭВМ предложенное матричное отображение структуры механизмов волнового привода может быть принято как математическая модель для решения задач их оптимизации. В качестве оптимизационного может быть принят критерий минимума затрат в производстве и эксплуатации СВЗР.

Исходной информацией для использования расчетного алгоритма является матрица (f_{ij}) , $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$ и векторы $\{S_i\}$ и $\{E_j\}$, где i – перечень типоразмеров СВЗР, способных в совокупности удовлетворить j -е требуемые параметры; E_j – величина требуемого выпуска СВЗР с j -ми параметрами; S_i – затраты на организацию производства i -го типоразмера в соответствии с E_j .

Матрица (S_{ij}) может быть представлена таблицей условнопеременных затрат, зависящих от программы выпуска и рассчитанных для каждого i -го типоразмера СВЗР. Расчет матрицы (S_{ij}) ведется с учетом коэффициента замены параметров P_{ij} , показывающего изменение срока службы i -го типоразмера при использовании в режиме работы j -го механизма привода.

Коэффициент замены параметров можно выразить по формуле:

$$P_{ij} = \left(\frac{M_j^{\text{ЭКВ}}}{M_i^{\text{ЭКВ}}} \right)^m \cdot \frac{n_j^{\text{ЭКВ}} T_j}{n_i^{\text{ЭКВ}} T_i}, \quad (11)$$

где $M^{\text{ЭКВ}}$ и $n^{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентные параметры нагрузки; T_j – требуемый ресурс механизма привода; T_i – расчетный ресурс СВЗР; m – показатель кривой усталости материала гибкого колеса СВЗР.

Расчитанный коэффициент замены P_{ij} округляется до целого и показывает, сколько i -х типоразмеров СВЗР потребуется для установки в j -м механизме привода за весь срок службы машины.

Выводы.

1. В результате внедрения параметрического ряда СВЗР в производство унифицированных механизмов привода экономия будет возникать за счет уменьшения себестоимости, увеличения программ выпуска и за счет уменьшения массы СВЗР.

2. В результате решения оптимизационной задачи по методике [4] был получен искомый ряд. Он состоит из 9 типоразмеров СВЗР, каждый из которых базируется на 5 видах по параметрам $i_{\text{треб}}$ и $M_{\text{треб}}$. КПД СВЗР для всех 9 типоразмеров должен изменяться в пределах 0,87...0,7.

Литература: 1. ГОСТ 23108-78. Редукторы волновые зубчатые одноступенчатые. Основные параметры. – Введен 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 5с. 2. Волков Д.П., Бондаренко С.В., Кайтуков Б.А. Об унификации зубчатых колес механизмов привода строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. – 1980. – №12. – С.18–20. 3. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій: Автореферат дис... докт.техн.наук. – Харків: ШМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 38с. 4. Типовая методика оптимизации многомерных параметрических рядов. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 43с. 5. Беркович М.М., Очеретянный С.М. Многоуровневые задачи построения оптимальных параметрических рядов // Стандарты и качество. – 1975. – №3. – С.12–14. 6. Слесарев М.Ю. Построение параметрических рядов механизмов трансмиссий // Стандарты и качество. – 1976. – №5. – С.18–23. 7. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. – М.: Изд-во АН СССР, 1975. – 5с. 8. Береснев В.Л., Гимади Э.Х., Дементьев В.Т. Экстремальные задачи стандартизации. – Новосибирск: Наука, 1978. – 33с. 9. Слесарев Г.А. Теоретические основы построения систем редукторов: Автореферат дис... докт.техн.наук. – М., 2007. – 32с.

Приймаков О.Г., Устиненко О.В., Приймаков Г.О.

НОВИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ КОНСТРУКТИВНО-УНІФІКОВАНОГО РЯДУ СИЛОВИХ ХВИЛЕВИХ РЕДУКТОРІВ ДЛЯ МАШИНОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ

У статті запропоновано та описано новий метод побудови конструктивно-уніфікованого ряду силових хвильових зубчастих редукторів, заснований на комбінаториці і динамічному програмуванні багатofакторних процесів.

Prijmakov A.G., Ustinenko A.V., Prijmakov G.A.

NEW METHOD OF CONSTRUCTION OF THE CONSTRUCTIVE-UNIFIED SERIES BY POWER WAVE REDUCERS FOR UKRAINE MACHINE INDUSTRY

In paper the new method of construction of the constructive-unified series by power wave gear reducers is offered and presented. This method is based on combination theory and dynamic programming of multifactorial processes.