

УДК 62-233.3/.9

Сравнение методов проектирования планетарных передач с оценкой критериев качества

Леонов И. В.¹, Подчасов Е. О.^{1,*}

[*podchacha@yahoo.com](mailto:podchacha@yahoo.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассматривается критериальная методика проектирования двухрядных планетарных передач с двумя внешними зацеплениями, в которой путем снижения числа возможных вариантов конструктивного решения выделяется область снижения значений критерия габаритных размеров. Произведен анализ конструкционных, эксплуатационных и технологических свойств передач, расчет которых произведен с помощью новой методики, включающей такие критерии как габаритные размеры, точность воспроизведения передаточного числа, технико-экономические аспекты изготовления редукторов изучаемого типа. Осуществлено рассмотрение нормирования некоторых основных формообразующих операций механической обработки зубчатых колес, входящих в передачу и принципиального состава штучно-калькуляционного времени для обработки на зубообрабатывающих станках в зависимости от метода проектирования.

Ключевые слова: планетарный редуктор, проектирование, нормирование затрат на механическую обработку, математическая модель, критерии качества, габаритные размеры

Введение

Функционирование современной экономики всецело зависит от использования различных машин. Исполнение многочисленных задач, возлагаемых на машинное оборудование обществом требует потребления огромного количества механической энергии, сообщаемой механической системе за счет различных двигателей. Объединение же двигателей и исполнительных механизмов в свою очередь происходит посредством различных передач.

Среди многочисленных типов передач важное место занимают планетарные передачи. Обладая рядом неоспоримых достоинств и отличий от других типов передач вращательного движения, планетарная передача может быть использована в качестве редуктора или как дифференциальный механизм. Планетарная передача прочно занимает одно из лидирующих мест по частоте применения в трансмиссиях различных

технологических и транспортных машин, т.к. ее отличает удобная компоновка и высокая нагрузочная способность.

Несмотря на то, что планетарные передачи используются человеком более двух тысяч лет и были употреблены еще в антикитерском механизме, до сих пор не предложен простой метод их проектирования, позволяющий как минимизировать время конструкторской подготовки редукторов, так и оптимизировать их эксплуатационные свойства и технологические качества.

1. Классическая методика проектирования планетарных передач

Планетарная передача является сложной системой, проектирование которой связано с выбором и разработкой конструкции многих звеньев. Основной методикой проектирования планетарной зубчатой передачи является определение числа зубьев колес с помощью метода сомножителей [1].

Рассмотрим применение указанного метода при проектировании двухрядных редукторов с двумя внешними зацеплениями [2,3].

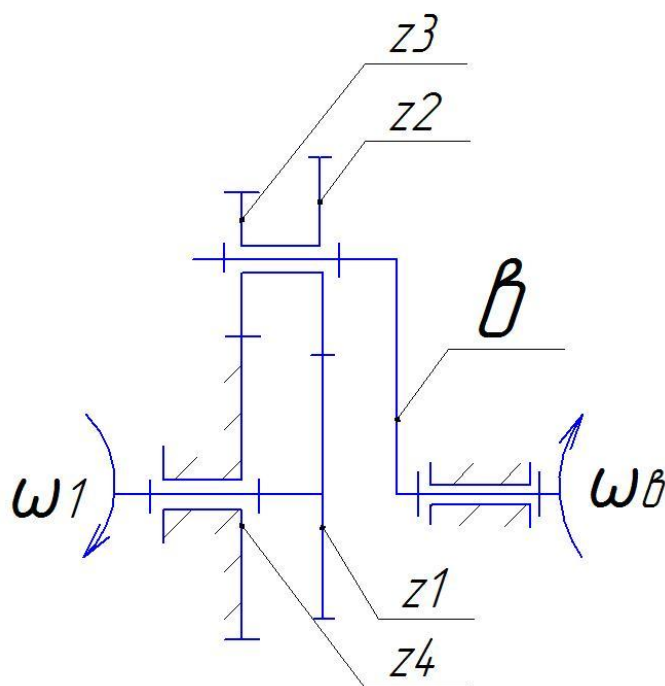


Рис. 1. Структурная схема двухрядного планетарного редуктора с двумя внешними зацеплениями

Передаточное отношение планетарного редуктора заданной схемы выражается уравнением с четырьмя неизвестными числами зубьев

$$u_{1b} = 1 - \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3},$$

откуда отношение бесчисленного множества чисел зубьев можно найти из соотношения

$$\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = 1 - u_{1b}. \quad (1)$$

Подобранные из соотношения 1 числа зубьев колес кроме заданного передаточного отношения должны удовлетворять условиям соосности, соседства и сборки.

Уравнение соосности для колёс, нарезанных без смещения, при равных модулях в обоих рядах имеет вид

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4. \quad (2)$$

Числа зубьев каждого из зубчатых колес представляют в виде произведения трех множителей

$$z_1 = q\alpha A; z_2 = q\alpha B; z_3 = q\beta C; z_4 = q\beta D. \quad (3)$$

Проводя подстановку выражений (3) в уравнение соосности (2), получают уравнение $\alpha(A + B) = \beta(C + D)$, которое превращается в тождество при условии (4)

$$\alpha = C + D; \beta = A + B. \quad (4)$$

Подстановка коэффициентов α и β в формулу (3), дает выражение для расчёта чисел зубьев (5)

$$z_1 = qA(C + D); z_2 = qB(C + D); z_3 = qC(A + B); z_4 = qD(A + B), \quad (5)$$

где общий множитель q выбирается из ряда чисел $q = 1, 2, 3 \dots$

После преобразования и подстановки выражения (5) для числа зубьев получаем уравнение для выбора множителей, которое дает бесчисленное множество вариантов, никоим образом не связанное с критерием габаритных размеров [4]:

$$\frac{BD}{AC} = 1 - u_{1b}.$$

Определив случайным образом множители A, B, C, D по формулам (3), число зубьев колес определяют по выражению (5).

Поэтому подбор числа зубьев по классическому методу сомножителей представляется затруднительным ввиду необходимости анализа широкого ряда вариантов возможных чисел зубьев. Кроме этого, недостатком метода является нерешенность проблемы оптимизации конструкции.

Определение оптимальных расчетных значений чисел зубьев при использовании метода сомножителей затруднено и требует решения задач математического программирования [5-7] с учетом эксплуатационных (кинематическая точность), конструкционных (габаритные размеры) и технологических (минимизация суммарного числа зубьев) критериев, и поэтому классический метод требует совершенствования.

2. Новый метод проектирования

Предлагаемый метод проектирования планетарных зубчатых передач является производной от классического метода сомножителей, в котором ограничение числа вариантов производится путем выделения перспективной области множества сниженных значений критерия габаритных размеров, как одного из главных критериев проектирования. Сближая размеры зубчатых колес в двух рядах зацеплений и приближая числа зубьев к минимально возможному из условий подреза, размещения многочисленных сателлитов, сборки редуктора, назначая числа зубьев одного из рядов равными среднему арифметическому из чисел зубьев другого ряда осуществляется оптимизация по критерию минимизации размеров. В целях обеспечения простоты расчетов и оптимизации решения принято допущение о возможности выбора одинаковых коэффициентов, т.е. $C = D$. Такое допущение правомерно при малых по модулю передаточных отношениях u_{1b} , которые возможно реализовать за счет колес только первой ступени.

В таком случае метод сомножителей вырождается, и проектирование планетарной передачи сводится к определению коэффициентов A и B :

$$B/A = 1 - u_{1b}, \quad (6)$$

где $u_{1b} = \frac{1}{u_{b1}}$.

Таким образом, числа зубьев передачи, спроектированной по упрощенному методу, определяются как $z_1 = qA$; $z_2 = qB$; $z_3 = z_4 = \frac{z_1 + z_2}{2}$, при этом из условия отсутствия подреза любое $z_i > 17, i = 1, 2, 3, 4$.

Кроме ускорения расчета, применение упрощенного метода расчета позволяет оптимизировать конструкцию передачи без применения методов математического программирования. Так как в расчете присутствуют только два коэффициента, связанные линейно, все возможные варианты конструкции передачи, рассчитанные указанным способом, будут линейно зависимы между собой. Тогда оптимальной с точки зрения габаритов и затрат на обработку зубьев будет конструкция, с минимальным числом зубьев. Ввиду линейной зависимости между всеми вариантами расчета, оптимальной по указанным критерием будет являться та передача, тройка чисел зубьев которой z_1, z_2, z_{34} будет взаимно простой (то есть будет невозможно дальнейшее сокращение).

3. Сравнение передач, спроектированных двумя разными методами

Рассмотрим варианты исполнения планетарных редукторов с передаточным числом $u_{1h} = +10$, рассчитанные классическим и новым упрощенным методом сомножителей.

Таблица

	Метод сомножителей		Упрощенный метод
	Расчетный коэф.	Число зубьев	Число зубьев
z_1	4	56	18
z_2	2	28	20
z_3	5	30	19
z_4	6	54	19

Габарит передачи зависит от $\max(z_1 + 2z_2; 2z_3 + z_4)$, то критерием снижения габаритных размеров является минимизация этой функции. Для передачи, рассчитанной классическим методом, габарит равен $114m$, в то время как при расчете упрощенным методом габарит составляет $58m$, где m – модуль передачи.

С точки зрения технологии изготовления, лучшим будет считаться тот из редукторов, у которого общее число механически обрабатываемых поверхностей будет минимально, т.е. будет осуществлена оптимизация по критерию $(z_1 + kz_2 + kz_3 + z_4) = \min$.

Для рассматриваемых передач $\sum z_{\dot{m}i} = 284, \sum z_{\dot{\alpha}d} = 154$.

Таким образом получается, что с точки зрения объемов механической обработки редуктор, спроектированный по упрощенному методу превосходит тот, что рассчитан методом сомножителей классического вида.

Однако, для того, чтобы дать окончательное заключение по технологическому сравнению методов проектирования редукторов, рассмотрим, какое влияние оказывает применяемый при проектировании метод на норму штучно-калькуляционного времени на производства элементов планетарной передачи.

4. Влияние метода проектирования передачи на норму штучно-калькуляционного времени ее изготовления

Рассмотрим влияние метода проектирования на норму времени на изготовление всех элементов редуктора. Штучно-калькуляционное время определяется как

$$T_{шк} = T_{ш} + \frac{T_{нз}}{n} \quad (7)$$

где $T_{ш}$ - штучное время, $T_{нз}$ - подготовительно-заключительное время, n – объем партии изделий [8].

В свою очередь, штучное время определяется как $T_{шт.} = T_o + T_b + T_{т.о} + T_{о.о} + T_{отд}$, где T_o – машинное время, T_b – вспомогательное время, $T_{т.о}$ – время на технологическое обслуживание, $T_{о.о}$ – время на организационное обслуживание, $T_{отд}$ – время на отдых и личные надобности.

Из данных составляющих от методики проектирования напрямую зависят основное и вспомогательное времена [9-10]. Машинное время при обработке зубчатых колес червячно-модульными фрезами определяется как

$$T_0 = \frac{(l_1 + b + l_2)z}{n_\phi S_0 K}$$

где l_1, l_2 - перебег и недобег инструмента, b – суммарная ширина обрабатываемых колес.

Из формулы видно, что длины перебегов и недобегов существенно влияют на основное время обработки. Вспомогательное время при обработке зубчатых колес преимущественно формируется из времени, затрачиваемого на установку заготовок на оправки и закрепление оправок на станках.

Технологическим достоинством операций зубообработки является их приспособленность к пакетной обработке, когда одновременно обрабатывается более одного изделия. Это позволяет уменьшить суммарную длину перебегов и недобегов при изготовлении передачи, а так же сократить число установок заготовок на станок [11].

При проектировании двухрядной передачи методом сомножителей имеем четыре типоразмера зубчатых колес, подлежащих обработке, что означает необходимость четырехкратной установки оправок с заготовками и увеличение суммарной длины недобегов и перебегов, что приводит к росту машинного и вспомогательного времени.

При проектировании упрощенным методом передача содержит колеса трех типоразмеров, что позволяет производить пакетную обработку сразу сателлитов и опорного колеса. Учитывая также, что время на обслуживание и отдых определяется как доля от оперативного времени, представляющего сумму машинного и вспомогательного времен, можно говорить о том, что возможность пакетной обработки позволяет дополнительно сократить затраты времени на изготовление планетарной передачи.

5. Заключение

Разработанная методика упрощенного расчета двухрядных планетарных передач с двумя внешними зацеплениями может быть применена для упрощения и автоматизации проектирования редукторов и оптимизации их конструкций.

Планетарные передачи, спроектированные упрощенным методом по конструкторским и технологическим критериям в целом можно считать превосходящими передачи, рассчитанные традиционным методом сомножителей.

Список литературы

1. Левитская О.Н., Левитский Н.И. Курс теории механизмов и машин. М.: Высшая школа, 1985. 280 с.
2. Крайнев А.Ф. Проектирование зубчатых механизмов. М.: Машгиз, 1971. 208 с.
3. Леонов И.В., Леонов Д.И. Теория механизмов и машин. М.: Высшее образование, 2015. 239 с.

4. Vidal P. Aide memoire d'automatique. Paris: Dunod, 1985. 196 p.
5. Белоконев И.М. Механика машин. Расчёты с применением ЭЦВМ. Киев: Вища школа, 1978. 232 с.
6. Егорова О.В., Леонов И.В., Павлов Б.И. Применение системы Mathcad в курсовом проектировании по ТММ: учеб. пособие / под ред. И.В. Леонова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 49 с.
7. Барышникова О.О., Леонов И.В., Кузенков В.В. и др. Использование системы МАТНСАД в курсовом проектировании при выполнении домашних заданий по теории механизмов и машин: учеб. пособие / под ред. И.В. Леонова и Г.А. Тимофеева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 66 с.
8. Справочник нормировщика / ред. А.В. Ахомов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987. 458 с.
9. Справочник нормировщика-машиностроителя. Т. 2. Техническое нормирование станочных работ / ред. Е.И. Стружестрах. М.: Машгиз, 1961. 826 с.
10. Адамчук В.В. Организация и нормирование труда. М.: Финстатинформ, 1999. 301 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / ред. А.М. Дальский. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2003. 944 с.

Comparison of Epicyclic Gearing Design Methods by Means of Quality Criteria Evaluation

I.V. Leonov¹, E.O. Podchasov^{1,*}

[*podchacha@yahoo.com](mailto:podchacha@yahoo.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: epicyclic gearing, design, technical regulation, mathematical model, quality criteria, overall dimensions

The performance of modern economy depends on the usage of different machines. Execution of the many tasks a society entrusts to the machinery requires a huge amount of the mechanical energy imparted to the mechanical system due to different engines. Combining the motors and actuators in turn occurs through various transmissions.

Among the numerous types of transmission the planetary gears occupy an important place. With a number of advantages and differences from other types of transmission of rotational motion, planetary gear can be used as a gear or a differential gear. The planetary gear firmly holds a leading position for its frequent use in transmissions of various technological and transport vehicles, as it has a convenient layout and high load capacity.

Despite the fact that people have been using planetary gears over two thousand years, there is no simple method of their design, allowing both a minimizing design time and an optimization of their performance characteristics and technological qualities.

The proposed design method is derived from the classical method of factors. It limits the number of options by isolating a promising region of a set of reduced criteria values of the overall dimensions, one of the main design criteria. A minimizing size criterion optimization is provided through rapprochement of gear sizes in two rows of gearings and proximity to the minimum possible number of teeth from the undercut condition, environment for numerous satellites, and gear assembly as well as through specifying the numbers of teeth of one of the rows to be equal to the arithmetic average of the teeth numbers of the other row.

References

1. Levitskaya O.N., Levitskii N.I. *Kurs teorii mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines course]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 280 p. (in Russian).
2. Krainev A.F. *Proektirovanie zubchatykh mekhanizmov* [Gearing designing]. Moscow, Mashgiz Publ., 1971. 208 p. (in Russian).

3. Leonov I.V., Leonov D.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vysshee obrazovanie Publ., 2015. 239 p. (in Russian).
4. Vidal P. *Aide memoire d'automatique*. Paris, Dunod, 1985. 196 p.
5. Belokonev I.M. *Mekhanika mashin. Raschety s primeneniem ETsVM* [Mechanics of Machines. Calculations using a digital computer]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1978. 232 p. (in Russian).
6. Egorova O.V., Leonov I.V., Pavlov B.I. *Primenenie sistemy Mathcad v kursovom proektirovanii po TMM* [Application of Mathcad in theory of mechanisms and machines course design]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 49 p. (in Russian).
7. Baryshnikova O.O., Leonov I.V., Kuzenkov V.V., et al. *Ispol'zovanie sistemy MATHCAD v kursovom proektirovanii po teorii mekhanizmov i mashin* [Using Mathcad in course design and homework on the theory of mechanisms and machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 66 p. (in Russian).
8. Akhomov A.V., ed. *Spravochnik normirovshchika* [Quantity surveyor guidebook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 458 p. (in Russian).
9. Struzhestrakh E.I., ed. *Spravochnik normirovshchika-mashinostroitelya. T. 2. Tekhnicheskoe normirovanie stanochnykh rabot* [Quantity surveyor - machine engineer guidebook. Pt. 2. Technical optimization of mechanical treatment]. Moscow, Mashgiz Publ., 1961. 826 p. (in Russian).
10. Adamchuk V.V. *Organizatsiya i normirovanie truda* [Organization and optimization of work]. Moscow, Finstatinform Publ., 1999. 301 p. (in Russian).
11. Dal'skii A.M., ed. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 t. T. 2* [Technologist-machine engineer guidebook. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 944 p. (in Russian).