

В.В. СТАВИЦКИЙ, к.т.н., доцент ВНУ им. В. Даля, Луганск;
П.Л. НОСКО, д.т.н., проф., проректор ВНУ им. В. Даля;
С.П. РОМАНОВ, аспирант ВНУ им. В. Даля

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Предложены инварианты подбора процессов вращения и зацепления зубчатых колес в виде безразмерных комплексов, обобщающих критериальную информацию необходимую и достаточную для оптимизации конструктивных решений. Получено критериальное уравнение связи, соблюдение которого позволяет рассчитывать параметры зубчатой передачи в зависимости от скоростного и нагружающего режимов эксплуатации с учетом материалов и термообработки зубчатых колес, типа и характеристик смазочного материала.

Ключевые слова: высокоскоростная зубчатая передача, оптимизация.

Актуальность задачи. Современное энергетическое, химическое и транспортное машиностроение остро нуждается в значительном количестве редукторов для компрессорных станций газопроводов, компрессоров аммиака в технологических циклах производства удобрений и синтетических волокон, перспективных моделей гидравлических, паровых и газовых турбогенераторов, детандергенераторных установок и коробок скоростей для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В качестве двигателя в таких установках используют паровую, газовую или гидравлическую турбину или ДВС. Исполнительными машинами являются электрогенераторы, воздушные и газовые компрессоры, гидравлические насосы. Несовпадение оптимальных частот вращения валов двигателя и исполнительской машины обуславливает необходимость применения зубчатого редуктора.

Развитие современного машиностроения основывается на поиске новых решений, предусматривающих повышение нагрузочной способности, срока службы, уменьшение веса и габаритов, а также улучшения энергетических характеристик эффективности выпускаемых изделий.

Наиболее остро указанные требования проявляются при разработке высокоскоростных и тяжелонагруженных зубчатых передач, в частности – редукторов привода генераторов.

Анализ последних исследований и литературы. По рекламным публикациям зарубежных фирм, таких как Renk, Maag, Graffenstaden и других [1], в качестве привода электрогенераторов мощностью до 100МВт рассматриваются в основном одноступенчатые однопоточные редукторы с шевронными или косозубыми передачами.

При таких передаваемых мощностях потери составляют 1МВт и более. В высокоскоростных зубчатых передачах значительную часть общих потерь мощности составляют потери, не связанные с передаваемой нагрузкой. К таким потерям относят потери аэродинамического сопротивления вращению зубчатых колес, периодического сжатия и расширения масловоздушной смеси в замкнутом пространстве между зубьями колес (компрессорные потери). Например, для редукторов, работающих с окружной скоростью около 150м/с, такие потери составляют 80%, а потери на трение только 20% [2]. Попытки учесть эти потери мощности при анализе [3] и проектировании высокоскоростных зубчатых передач основываются в основном на эмпирических данных, ко-

торые отличаются в различных исследованиях в несколько раз. Такие погрешности значительно снижают степень достоверности при определении энергетической эффективности эксплуатации высокоскоростных зубчатых передач.

Необходимо также учитывать, что передача больших мощностей неизбежно связана с высокой контактной и изгибной напряженностью зубьев, с высокими показателями нагруженности подшипников скольжения, и большой шириной зубчатых венцов, что в свою очередь значительно увеличивает потери, не связанные с передаваемой нагрузкой. Попытки снизить контактные и изгибные напряжения переходом на двухпоточную схему одноступенчатого редуктора РГ046 [4] практически удваивают эти потери.

В конце 90-х годов специалистами швейцарской фирмы MAAG-GEAR AG запатентована и внедрена технология высокоэффективного турборедуктора HET (High Efficiency Turbogear) [5]. Уменьшение потерь мощности в зубчатом зацеплении удалось достигнуть за счет создания частичного вакуума (уровень разрежения 85%). Столь кардинальное решение проблемы снижения потерь мощности приводит к ухудшению теплоотвода из зоны зацепления вследствие отсутствия циркуляции масловоздушной смеси в пространстве между зубьями и дополнительному расходу электроэнергии на работу вакуумного насоса [2].

В работах [6-9] проведен анализ влияния условий эксплуатации и геометрических параметров зубчатой передачи на ее КПД, с учетом, как механических потерь, так и потерь мощности вследствие гидроаэродинамического сопротивления вращению зубчатых колес и периодического сжатия-расширения масловоздушной смеси в замкнутом между зубьями пространстве. Полученные авторами относительно простые аналитические зависимости для определения КПД позволили разработать основы метода выбора параметров передачи [10]. Разработка новой методологии проектирования энергонасыщенных и в то же время ресурсо- и энергосберегающих зубчатых передач является актуальной научно-практической задачей при исследовании высокоскоростных трансмиссий.

Цель статьи. Предложить критериальное уравнение связи независимых и управляющих параметров высокоскоростных зубчатых передач, на основании которого проводить поиск конструктивно-технологических параметров передач, отвечающим условиям их существования и необходимым показателям качества.

Изложение основного материала. Потери мощности в результате аэрогидродинамического сопротивления и периодического сжатия-расширения не зависят от передаваемой нагрузки и прямо пропорциональны занимаемому передачей объему $O_i = \bar{b} \cdot r_i^3$, который в свою очередь определяется расчетом

$$\text{передачи на прочность, } O_i = \frac{T_1 K_H E^* (u+1) \cos \beta}{[\sigma_H]^2 \cos \alpha \pi \epsilon_{\alpha u} \sin 2\alpha}.$$

Тогда независимые от передаваемой нагрузки потери мощности могут быть представлены в виде математической функции расчетного номинального момента. При этом условии суммарный коэффициент потерь мощности приобретает следующий вид

$$\Psi_{\Sigma} = \bar{p}_{a1} \cdot \Sigma \cdot \frac{\Pi}{G \cdot E u \cdot \bar{b}}, \quad (1)$$

где $\Pi = E_{np}^* \cdot p_a / [\sigma_H]^2$, $G = \frac{\pi \cdot \epsilon_{\alpha} \cdot \sin 2\alpha}{K_H \cdot \cos \beta} \cdot \frac{u}{1+u}$ – прочностной и геометриче-

ский инварианты подобия пары зубчатых колес соответственно; $N = \bar{b}_1 \cdot \left[C_{k1} + C_{k2} \cdot u^3 \cdot \frac{\bar{\rho}_{a2}}{\bar{\rho}_{a2}} \cdot \frac{\bar{b}_2}{\bar{b}_1} \right] \cdot \sin 2\alpha \cdot \cos^2 \beta$, $\Gamma = \bar{V}_3 \cdot N \cdot \arccos^2(1 - \bar{h}_i)$ – аэро- и гидродинамический инварианты подобия пары зубчатых колес соответственно; $E = (C_{M1} + u^2 \cdot C_{M2}) \cdot \cos \alpha / 2$ – инвариант подобия вязкостного трения масловоздушной смеси на торцевых поверхностях зубчатого колеса; $\Theta = (\gamma_1 \cdot A_1^2 + \gamma_2 \cdot u^2 \cdot A_2^2) \left[\frac{1}{\text{Re}_i} + \frac{Eu \cdot \bar{S}_R^2}{2\varphi_a} \left(1 + \frac{\gamma_k}{2Eu} \right)^{1/\gamma_k} \right] \frac{\cos \alpha}{\bar{S}_R}$ – инвариант подобия вязкостного трения в радиальном зазоре между головками зубьев и корпусом передачи; $\Omega = \frac{u+1}{4u} \cdot \bar{b}_1^3 \cdot \Lambda \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta$ – инвариант подобия процессов периодического сжатия-расширения масловоздушной смеси в замкнутом между зубьями пространстве; $\Sigma = N + \Gamma + E + \Theta + \Omega$ – суммарный инвариант подобия пары зубчатых колес; C_{ki} – безразмерный момент аэродинамического сопротивления [9]; C_{Ri} – безразмерный момент сопротивления вследствие вязкостного трения периферии головок зубьев [9]; Λ – коэффициент, зависящий от геометрии зубчатой передачи [8].

Наиболее значимыми потерями мощности, несвязанными с передаваемой нагрузкой, являются потери аэродинамического сопротивления и периодического сжатия-расширения масловоздушной смеси в замкнутом между зубьями пространстве. Эти потери уменьшаются с ростом количества зубьев шестерни, передаточного отношения и угла наклона зубцов, но с ростом ширины зубчатого венца и окружной скорости потери значительно увеличиваются (рисунок, б).

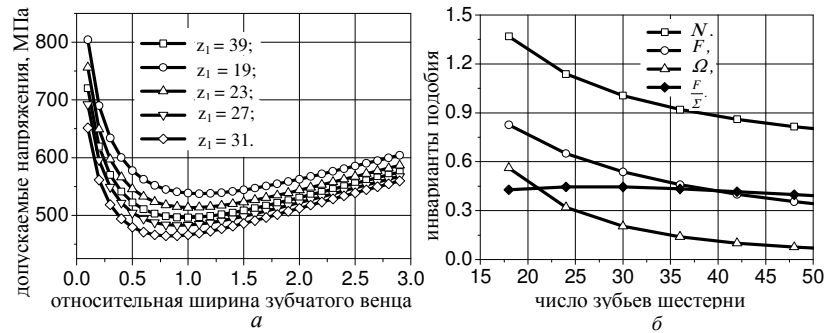


Рисунок – График зависимости допускаемых напряжений – а, и инвариантов подобия – б, от основных геометрических параметров зубчатых колес

Результаты многопараметрического анализа существующих зубчатых передач, показали наличие оптимальных окружной скорости и ширины зубчатого венца (рисунок, а) значения, которых определяются выражениями (2) и (3):

$$Eu_{opt} = v_*^{0,2} \left(\frac{4 \cdot \bar{\rho}_a \cdot \Sigma \cdot \Pi}{F \cdot G \cdot \bar{b}_1} \right)^{0,8}; \quad (2) \quad \bar{b}_1^{opt} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(A_1^2 - B_1^2) + u^3 \cdot (A_2^2 - B_2^2)}{\Lambda}} \cdot \frac{u}{1+u} \cdot \text{tg} \alpha, \quad (3)$$

$$\text{где } F = \frac{\left(\frac{1+u}{u} \right)^{0,75} \cdot \tau_i^{0,75} \cdot \left[\chi_1^{1,75} + \chi_2^{1,75} + (1-\chi_1)^{1,75} + (1-\chi_2)^{1,75} \right]}{\left[2 \cdot \text{tg} \alpha_w + \tau_i \cdot (\chi_1^2 + \chi_2^2) \cdot \frac{u-1}{2 \cdot u} \right]^{0,25}} \quad [6], \quad \bar{\rho}_a = \left[1 - (f_i \cdot \bar{b})^2 \cdot (k-1) / (2k \cdot Eu) \right]^{\frac{1}{k-1}} -$$

относительная плотность, f_i [7].

Анализ полученных выражений показал, что высокоскоростные зубчатые передачи, как объект оптимизации, имеют следующие независимые параметры: динамическая ($\bar{T}_1 = T_1 / (k \cdot p_a)$, k_t) и кинематическая нагрузки ($\bar{\omega}_1 = \omega_1 / c$), показатели прочности и упругих свойств материалов зубчатых колес (Π), реологические показатели масла и масловоздушной среды (v_* , k , p_a) и конструктивно-технологические параметры: зацепление; u ; \bar{b}_1 ; $\bar{\rho}_a$; инварианты N ; Γ , Θ , F ; E ; G , число ступеней передачи. Динамическая и кинематическая нагрузка являются исходными ограничениями, которые определяет потребитель. Качество материалов следует отнести к физическим параметрам, которые определяются назначением зубчатых передач и для некоторых отраслей машиностроения имеют свои приоритетные постоянные значения. Влияние разработчика и производителя на них является весьма ограниченным. К управляющим параметрам могут быть отнесены конструктивно-технологические параметры, связанные между собой значительным количеством ограничений, вид которых определяется типом передач и технологическими процессами их производства.

Перечисленные выше факторы создают общее для всех видов передач множество независимых и управляющих параметров, определяемое критериальным уравнением связи, которое отображает условие существования и качества зубчатых передач:

$$\bar{T}_1 \cdot \bar{\omega}_1^3 = \left(\frac{F}{4 \cdot \bar{\rho}_a \cdot k_t \cdot \Sigma \cdot v_*^{0,25}} \right)^{1,2} \cdot \left(\frac{G \cdot \bar{b}_{1opt}}{\Pi} \right)^{2,2}. \quad (4)$$

Условные обозначения. u – передаточное отношение; ω_i – угловая скорость шестерни, м/с; r_i – радиус делительной окружности; α – угол станочного зацепления, рад; β – угол наклона линии зубьев, рад; $A_i = r_{ai} / r_i$ – относительный радиус окружности вершин; r_{ai} – радиус окружности вершин, м; b_i – ширина зубчатого венца, м; того венца; $B_i = r_{fi} / r_i$ – относительный радиус окружности впадин; r_{fi} – радиус окружности впадин, м; p_a – атмосферное давление, МПа; E^* – приведенный модуль упругости материалов зубчатых колес, МПа; $Eu = p_a / (\rho_a \cdot V_{окр}^2)$ – критерий Эйлера; $V_{окр} = \omega_i \cdot r_i$ – окружная скорость; ρ_a – плотность масловоздушной смеси во впадинах зубчатых колес, кг/м³; k – показатель адиабаты масловоздушной смеси; $\text{Re}_i = \rho_a \cdot \omega_i \cdot r_i^2 / \mu$ – критерий Рейнольдса; $\bar{h}_i = h_i / r_{ai}$ – относительная глубина погружения зубчатого колеса в масляную ванну, c – скорость звука в масловоздушной смеси, м/с; k_t – частичность нагрузки, $\vartheta_* = \vartheta / (c \cdot k)$ – относительная вязкость смазочного масла.

Выводы. Предложены инварианты подобия процессов вращения и зацепления зубчатых колес в виде безразмерных комплексов, обобщающих критериальную информацию необходимую и достаточную для оптимизации конструктивных решений. Получено критериальное уравнение связи, соблюдение которого позволяет рассчитывать параметры зубчатой передачи в зависимости от

скоростного и нагружающего режимов эксплуатации с учетом материалов и термообработки зубчатых колес, типа и характеристик смазочного материала.

Список литературы: 1. Высоконагруженные редукторы – новые разработки. Материалы фирмы MAAG Gear Co. Ltd, 1992. 2. Дзэ Т. Высокоэффективные турборедукторы для газовых турбин / Томас Дзэ, перевод С.М. Иноземцев // Турбины и дизели. – 2005. – сентябрь-октябрь. – С.38-41. 3. Heingartner P. Determination Power Losses in the Helical Gear Mesh. / P. Heingartner, D. Mba // Gear Technology. – Sept. 2005. 4. Мироненко А.И. Тяжелонагруженный высокоскоростной редуктор привода генератора / А.И. Мироненко, Е.А. Гамза // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/10(57). – С.54-56. 5. Deeg Th. The MAAG High Efficiency Turbogear HET / Thomas Deeg // VGB Kraftwerkstechnik. 1996. – issue 1. 6. Ставицкий В.В. Определение механического КПД в зубчатом зацеплении с учетом условий эксплуатации / Ставицкий В.В., Носко П.В. // Вестник НТУ "ХПИ" – Харьков: ХПИ, 2011. – №51. – С.152-164. 7. Ставицкий В.В. Оценка потерь мощности в высокоскоростных цилиндрических передачах / В. В. Ставицкий, П. Л. Носко // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: ХПИ, 2011. – №28. – С.137-149. 8. Ставицкий В.В. Определение коэффициента потерь мощности вследствие сжатия маслораздушной смеси между зубьями цилиндрических передач / Ставицкий В.В., Носко П.Л. // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2011. – №5(159), частина 2. – С.313-318. 9. Ставицкий В.В. Анализ аэрогидродинамических потерь в зубчатых передачах / В.В. Ставицкий, П.Л. Носко, П.В. Филь // Вісник нац. ун-ту ім. В.Даля. – 2009 – №12(142). – С.125-131. 10. Ставицкий В.В. Метод проектирования энергосберегающих высокоскоростных зубчатых передач / В.В. Ставицкий, П.Л. Носко // Вестник НТУ "ХПИ" – Харьков: ХПИ, 2012. – №36. – С.132-139.

Поступила в редколлегию 30.03.2013

УДК 621.833

Оптимальное проектирование высокоскоростных зубчатых передач / В.В. Ставицкий, П.Л. Носко, С.П. Романов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2013. – №40(1013). – С.148-152. – Бібліогр.: 10 назв.

Запропоновано інваріанти подібності процесів обертання та зачеплення зубчастих коліс у вигляді безрозмірних комплексів, які узагальнюють критеріальну інформацію необхідну та достатню для оптимізації конструктивних рішень. Отримано критеріальне рівняння зв'язку, дотримання якого дозволяє розраховувати параметри зубчастої передачі в залежності від швидкісного та навантажувального режимів експлуатації з урахуванням матеріалів та термообробки зубчастих коліс, типу та характеристик змащувального матеріалу.

Ключові слова: високошвидкісна зубчаста передача, оптимізація.

Criteria of similarity of processes of rotation and claspings of gear-wheels are offered as dimensionless complexes; criterion information necessary and sufficient for optimization of structural decisions is summarized. Criterion equation of connection is derived; being in compliance with the equation allows for calculations of gear parameters based on the exploitation speeds and loading modes, taking into account materials and heat treatments of gear-wheels and types and descriptions of lubricating material.

Keywords: hi-speed gear, optimization.

УДК 621.833

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н., доц., главный научный сотрудник
ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель;
В.Л. БАСИНЮК, д.т.н., доц., директор НТЦ ОИМ НАН Беларуси, Минск;
Е.И. МАРДОСЕВИЧ, к.т.н., заведующая сектором ОИМ НАН Беларуси;
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., профессор СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассматривается проблема оптимизации компоновочных схем силовых редукторов и зубчатых механизмов приборов. На основании анализа разных подходов и методов оптимизации разнообразных схем компоновки приводятся обобщенные рекомендации по оптимальному проектированию зубчатых механизмов.

Ключевые слова: оптимизация, зубчатый механизм, силовой редуктор.