

УДК 621.833

В. Н. СТРЕЛЬНИКОВ**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВЫХ СИЛ КРУПНОЙ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ**

Представлено результати експериментальних досліджень осьових сил великої хвильової зубчастої передачі. Вимір осьових сил виконувалося методом тензометрії на гнучкому колесі й генераторі хвиль одночасно. При зіставленні даних експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків, отримана задовільна збіжність результатів.

Ключові слова: осьова сила, гнучке колесо, генератор хвиль, тензорезистор.

Представлены результаты экспериментальных исследований осевых сил крупной волновой зубчатой передачи. Измерение осевых сил выполнялось методом тензометрии на гибком колесе и генераторе волн одновременно. При сопоставлении данных экспериментальных исследований и теоретических расчетов, получена удовлетворительная сходимость результатов.

Ключевые слова: осевая сила, гибкое колесо, генератор волн, тензорезистор.

Results of experimental researches of axial forces of a large wave gear are presented. Measurement of axial forces was executed by a tensometry method on a flexible gear and the generator of waves simultaneously. By comparison of the given experimental researches and theoretical calculations, satisfactory convergence of results is received. Experimental studies were conducted on industrial designs wave reducers actuators tilt the mobile mixer load capacity 600 tons of molten metal and ore mill volume 160 m³, weighing 220 tons of ore to be loaded.

Keywords: axial force, a flexible gear, the generator of waves, resistive-strain sensor.

Введение. Актуальность исследований. Внешние нагрузки через трансмиссии концентрируются на механическом приводе, который должен не только успешно их преодолевать, но и обеспечивать надёжность технических характеристик машин. Составляя 20...25 % массы, механический привод является основной причиной отказов горнорудного и металлургического оборудования (до 60 %). Резервом повышения уровня механического привода служат передовые технические решения, такие как волновые зубчатые передачи, отличающиеся высокой несущей способностью и хорошими эксплуатационными показателями. Достигнуты значительные успехи в исследовании геометрии, кинематики и прочности небольших серийно выпускаемых волновых передач, имеется существенный прогресс в области их производства [1].

Внедрение крупных волновых зубчатых передач в тяжёлом машиностроении затруднено влиянием масштабного фактора, не позволяющего переносить существующие расчётные методики на крупные образцы. В известных решениях не реализована функциональная связь силовых и энергетических процессов с упругой деформацией гибкого колеса. Не раскрыта физическая сущность явлений, происходящих в упругой кинематической паре: диск – гибкое колесо, не установлена природа осевых сил в области генератора волн под нагрузкой, что снижает технические характеристики, ограничивает несущую способность и сдерживает развитие крупных волновых зубчатых передач [2].

Исследования силовых факторов в упругих кинематических парах, направленные на повышение нагрузочной способности и повышение технического уровня крупных волновых передач – представляют научный и практический интерес для тяжёлого машиностроения, что определяет актуальность темы исследования.

Основное содержание и результаты работы. В серийно выпускаемых волновых передачах осевые силы имеют сравнительно небольшие значения [1–3] и не оказывают заметного влияния на их технические характеристики. В тяжёлом машиностроении используются крупные волновые редукторы с вращающимися моментами до 5·10⁵ Н·м и более, при этом осевые силы достигают сравнительно больших значений и их нельзя не учитывать при разработке и проектировании машин и агрегатов. Осевые силы возникают в кинематических парах, образованных дисками генератора волн и гибким колесом по причине

низкой крутильной жёсткостью гибкого колеса, асимметричной нагрузки дисков генератора волн, отклонения осей дисков от параллельности общей оси волновой передачи, естественных люфтов в сопряжениях элементов конструкции волновой передачи и кинематических парах генератора волн. Конструктивная модель исследуемого механизма, возбуждающего осевые силы в крупной волновой зубчатой передаче, представлена на рис. 1.

Гибкое колесо 1 установлено на ступице 8 выходного вала на шлицах и закреплено шайбами 9 и болтами 2, с постоянным моментом затяжки, контролируемым динамометрическим ключом. Осевые силы определялись тензометрией болтов 2 и упругих втулок 3 (рис. 1–3), расположенных по обе стороны ступицы.

Тензорезисторы 6 смонтированы на противоположных лысках болтов 2, соединены последовательно и включены в одно рабочее плечо полумоста тензоусилителя. Аналогично установлены тензорезисторы 7 на втулках 3. Тензорезисторы 6, 7 ориентированы в радиальном направлении с отклонением осей не более 1,5–2°. Нулевая отметка угловой координаты генератора волн ($\varphi = 0$) фиксируется на осциллограмме при пересечении большой оси генератора с осью болта (рис. 4).

При ресурсных испытаниях редуктора передвижного миксера МП–600АС грузоподъемностью 600 т расплавленного металла [4], при нагрузке $M_2 = 300$ кН·м, произошёл разрыв болтов М16 осевого крепления гибкого колеса, а также разрушилась бронзовая пята осевой фиксации генератора волн. Причины возникновения осевых сил, вызвавших разрушение нагруженных деталей крупной волновой передачи, были не ясны [5]. В литературных источниках нет сведений о физической природе упомянутых осевых сил возникающих в волновой передаче. Осевые силы на гибком колесе определялись тензометрией крепёжных болтов 5 и упругих втулок 6 (рис. 1–4), на генераторе волн – тензометрией упругой втулки 1, компенсирующей соответствующие осевые силы (рис. 6).

Для расшифровки осциллограмм нагрузки контрольного болта и упругой втулки выполняется деление полного угла оборота генератора волн 2π на удвоенное количество крепёжных болтов n , $\Delta\varphi = 2\pi/2n$. Для каждого угла φ_k , соответствующего расположению большой оси генератора волн относительно k -го болта, определяется значение ординат y_k и y_k' (рис. 4, а, б) $\varphi_k = 2\pi/n \cdot k$, где k – порядковый номер болта.

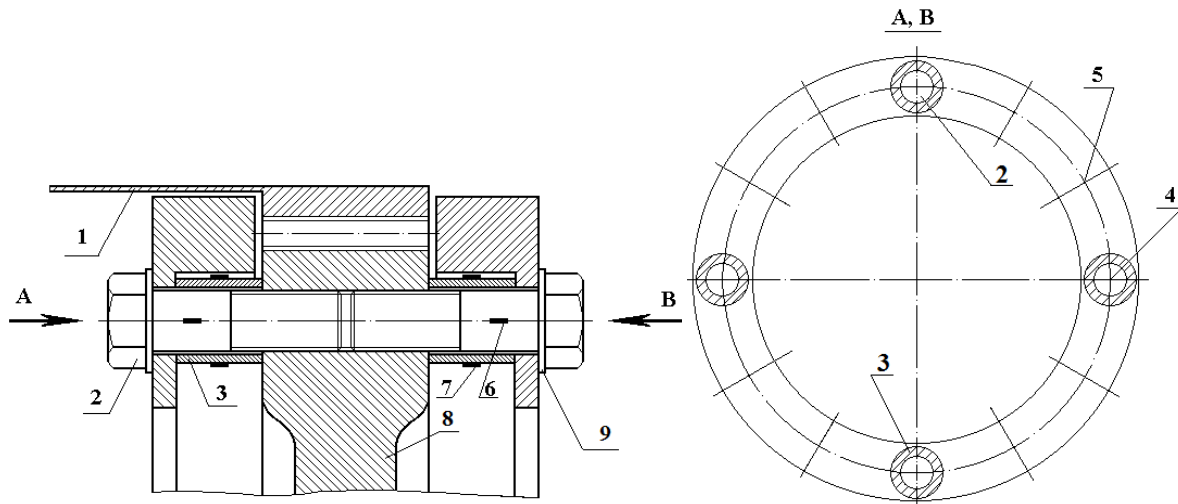


Рис. 1 – Сопряжение гибкого колеса со ступицей выходного вала редуктора:
 1 – гибкое колесо; 2 – болт тензометрический; 3 – упругая втулка; 4 – отверстия с тензометрическими болтами и втулками; 5 – свободные отверстия; 6, 7 – тензорезисторы; 8 – ступица выходного вала; 9 – шайба

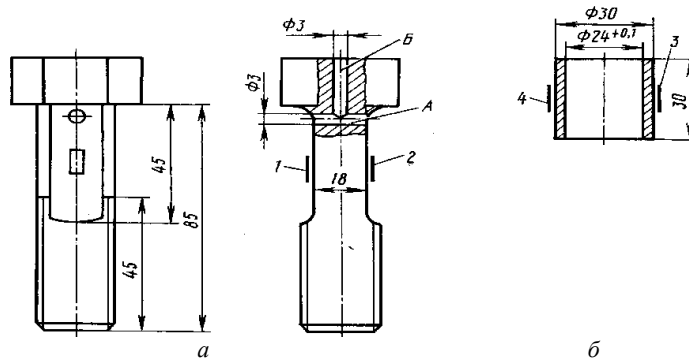


Рис. 2 – Тензометрический болт *a* и упругая втулка *б* с указанием позиционирования тензорезисторов: 1, 2, 3, 4

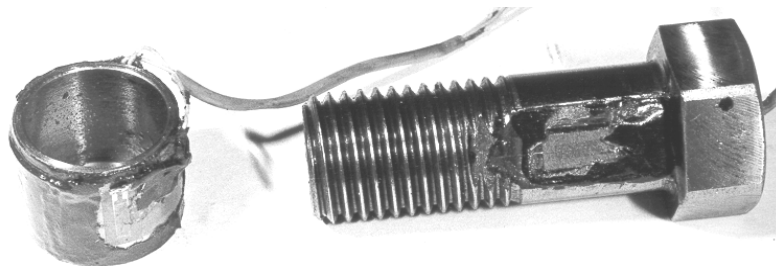


Рис. 3 – Тензометрический болт и упругая втулка с тензорезисторами изолированными маслостойким покрытием

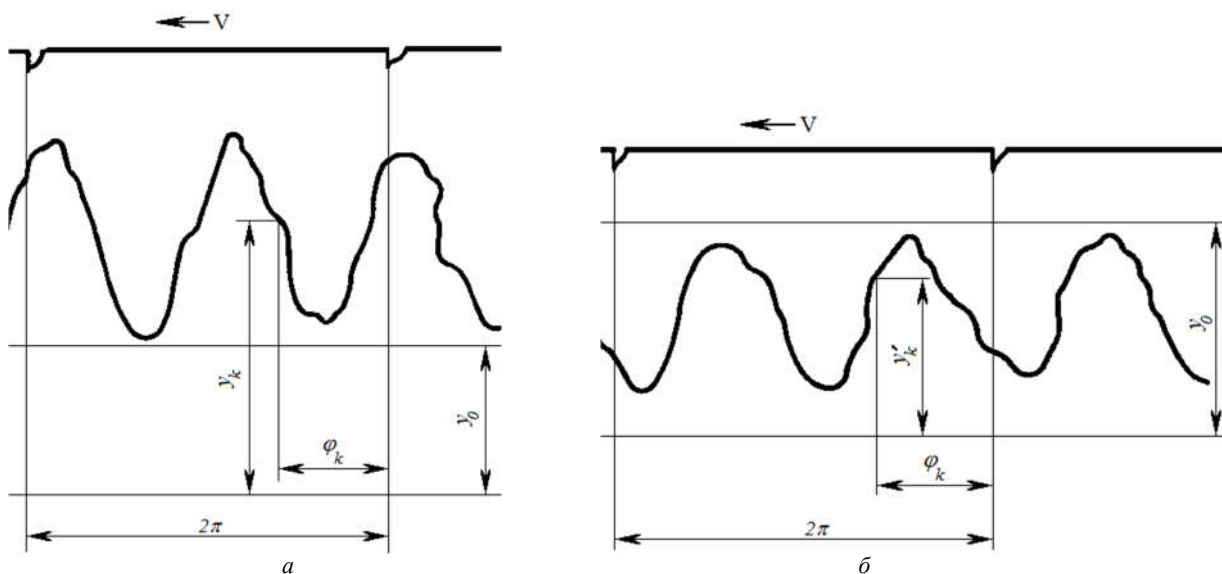


Рис. 4 – Участки осциллограмм нагрузки: *a* – тензометрических болтов; *б* – упругих втулок

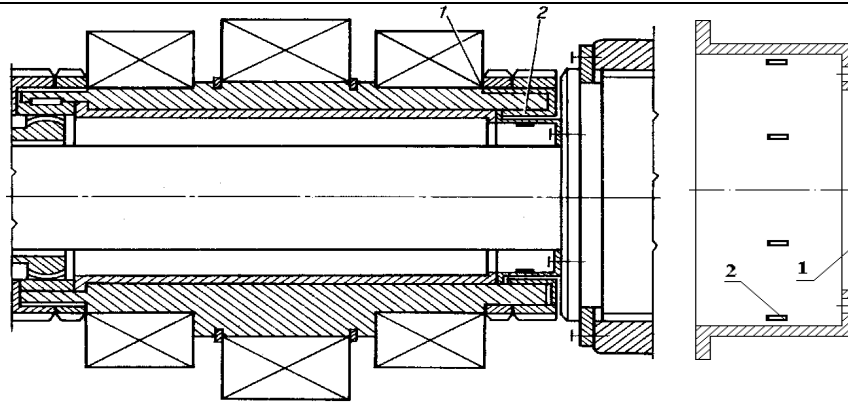


Рис. 5 – Конструктивная схема узла для измерения осевых усилий на генераторе волн: 1 – упругая втулка; 2 – тензорезистор

Результаты экспериментальных исследований осевых сил P от фазы его вращения, имеющих место в крупных волновых передачах с дисковым генератором волн, приведены на графиках (рис. 6), при фиксированной нагрузке волнового редуктора $M_2 = 500$ кН·м. Усилия на крепёжных болтах и упругих втулках гибкого колеса представлены на рис. 3, а, усилия на упругой втулке генератора волн показаны на рис 3, б.

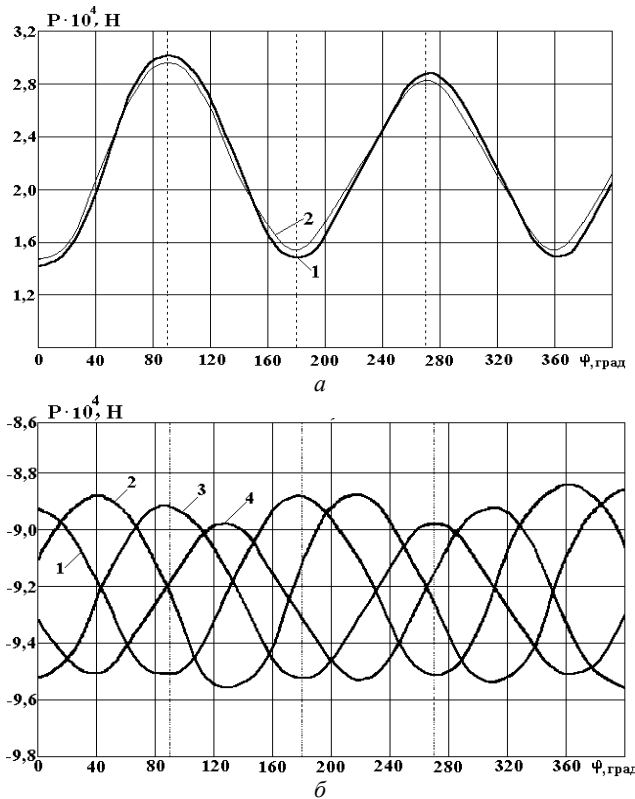


Рис. 6 – Зависимость осевой силы от угла поворота генератора ϕ , при нагрузке волнового редуктора $M_2 = 5 \cdot 10^5$ Нм, на: а – болте 1 и втулке 2 гибкого колеса; б – втулке генератора волн в соответствии с данными тензорезисторов 1–4

На рис. 7 представлены графики изменения осевых сил на гибком колесе и генераторе волн редукторов мельницы и миксера от нагрузочного момента M_2 . Эксперименты проводились на промышленных образцах редукторов приводов наклона передвижного миксера МП–600АС грузоподъёмностью 600 т расплавленного металла и перефутеровки рудоразмольной мельницы МГР 5500×7500 объёмом 160 м³, массой загружаемой руды 220 тонн [4]. В волновом редукторе привода рудоразмольной мельницы МГР 5500×7500 осевые силы больше, чем в аналогичном редукторе

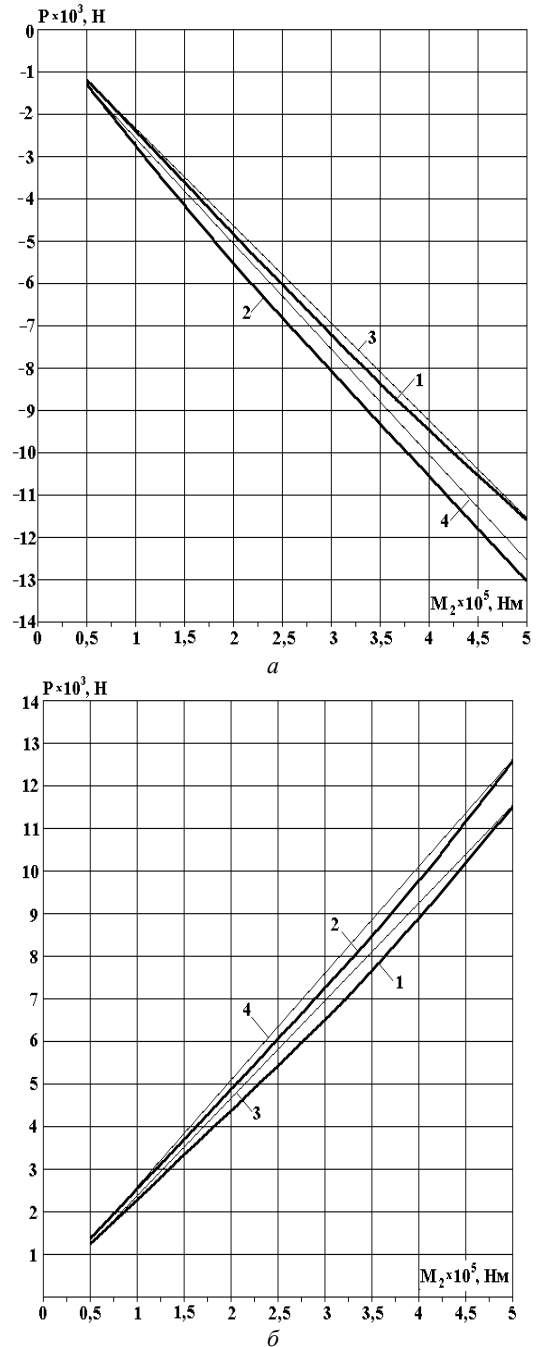


Рис. 7 – Зависимость осевой силы P от нагрузочного момента M_2 на: а – гибком колесе, б – генераторе волн 1, 3 – миксера МП 600АС, 2, 4 – рудоразмольной мельницы МГР 5500 × 7500; кривые 1, 2 получены экспериментально, 3, 4 – теоретически

привода поворота миксера МП–600АС. Для нагрузочных вращающихся моментов $M_2 = 5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$ Н·м, осевая сила на гибком колесе редуктора мельницы превышает аналогичную силу редуктора миксера на $9 \div 10$ %. При этом осевая сила на генераторе волн редуктора мельницы больше чем у редуктора миксера на $8 \div 11$ %. Это обусловлено соотношением геометрических размеров и передаточных отношений исследуемых редукторов. При одинаковых моментах M_2 , редуктор мельницы передаёт мощность на 28 % больше, чем редуктор миксера.

Выводы. Расхождение данных теоретических и экспериментальных исследований осевых сил в волновых редукторах рудоразмольной мельницы МГР 5500×7500 и миксера МП–600АС не превышает 6 %, что свидетельствует о надёжности полученных результатов.

Установлено, что осевые силы в волновой передаче имеют фрикционный характер. Источником осевых сил служат кинематические пары: диски – гибкое колесо. Не обеспечивается строгой параллельности осей дисков с осью волновой передачи. Это формирует подобие фрикционной винтовой пары: диски – гибкое колесо. Вращение ведущего вала вызывает винтовые движения генератора волн, который "ввинчивается" в гибкое колесо и создает осевую силу P , воспринимаемую гибким колесом. В серийных волновых передачах осевые силы малы и не влияют на их работу, в крупных волновых передачах осевые силы имеют большие значения, требуют измерения и учёта.

Для снижения осевых сил в крупных волновых передачах необходимо:

- исключить "плавающую" установку генератора и закрепить его на опорах;
- исключить "верчение" дисков относительно опор;
- устранить осевые люфты на генераторе волн и гибком колесе;
- установить между дисками и гибким колесом кольцо из бронзы;
- в зону контакта дисков с гибким колесом подвести принудительную смазку.

Выполнение приведенных рекомендаций позволит минимизировать перекосы дисков и амплитуду осевых перемещений, уменьшить осевые силы, которые при наличии больших эксцентрично установленных вращающихся массах, приобретают ударный характер.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження осевих сил великої хвильової передачі / В. М. Стрельников // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 131–134. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.

Исследование осевых сил крупной волновой передачи / В. Н. Стрельников // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 131–134. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.

Research of axial forces of large wave transmission / V. N. Strelnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 131–134. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0791.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Authors

Стрельников Виктор Микитович – доктор технічних наук, професор, Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, професор кафедри "Теоретична механіка та опір матеріалів"; тел. (8-980) 520-36-84; e-mail: viktor.strelnickov2017@yandex.ru.

Стрельников Виктор Никитович – доктор технічних наук, професор, Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, професор кафедри "Теоретична механіка та опір матеріалів"; тел. (8-980) 520-36-84; e-mail: viktor.strelnickov2017@yandex.ru.

Strelnikov Viktor Nikitovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Professor at the Department "Theoretical Mechanics and strength of materials"; tel. (8-980) 520-36-84; e-mail: viktor.strelnickov2017@yandex.ru.

Снижение сил трения в кинематических парах "диски – гибкое колесо", уменьшает осевые силы, энергетические потери и износ дисков.

Результаты исследований, полученные аналитическим и экспериментальными методами, хорошо согласуются между собой и реализованы на ПАО "НКМЗ" при производстве крупных волновых редукторов для горнорудного и металлургического оборудования.

Список литературы

1. Александров В. А., Стрельников В. Н. Волновые зубчатые передачи для тяжёлых машин // Технология, экономика, организация производства и управления. Серия 8. Выпуск 35. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1989. – 50 с.
2. Александров В. А., Скударь Г. М., Панков В. А., Стрельников В. Н. Волновые зубчатые передачи в тяжёлом и металлургическом машиностроении. – М. : Машиностроение, 1991. – 166 с.
3. Стрельников В. Н. Повышение нагрузочной способности волновых передач. – Белгород: БГУ им. Шухова, 2015. – 197 с.
4. Машины и стенды для испытания деталей / В. Л. Гадолин, Н. А. Дроздов, В. Н. Иванов и др. / Под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1979. – 343 с.
5. Стрельников В. Н., Суков Г. С., Суков М. Г. Исследование напряженно – деформированного состояния диска генератора волн крупной волновой передачи // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – Вып. 1, 2 (46). – С. 283–293.

References (transliterated)

1. Aleksandrov W. A. Strelnikov V. N. Volnovye zubchatye peredachi dlja tjazhjoljyh mashin [Wave gears for heavy machinery]. *Tehnologija, jekonomika, organizacija proizvodstva i uprav-lenija*. Series 8. Issue 35. Moscow, CNITJElTjzhmash. 1989. 50 p.
2. Aleksandrov W. A., Skudar G. M., Pankov V. A., Strelnikov V. N. *Volnovye zubchatye peredachi v tjazhjolom i metallurgicheskom mashinostroenii* [Wave gearing in heavy engineering and metallurgy]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1991. 166 p.
3. Strelnikov V. N. *Povyshenie nagruzochnoj sposobnosti volnovjyh peredach* [Increase loading capacity of wave transmission]. Belgorod, BSTU them. Shukhov Publ, 2015. 197 p.
4. Gadolin V. L., Drozdov N. A., Ivanov V. N., Reshetov D. N. *Mashiny i stendy dlja ispytaniya detalej* [Machines and test benches for parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1979. 343 p.
5. Strelnikov V. N. Sukov G. S., Sukov M. G. Issledovanie naprjazhenno – deformirovannogo sostojanija diska generatora voln krupnoj volnoj peredachi [Study of stress-strain state of a disk generator waves large wave transmission]. *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyj sb. nauchn. Trudov*. Donetsk, DonNTU, 2013. ISS. 1, 2 (46), pp. 283–293.

Поступила (received) 30.03.2017