

Государственный научный центр
Российской Федерации
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКИЙ ЦЕНТР СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Г. Гаврилов, Б.П. Толочко

НАПРЯЖЕННАЯ ФРИКЦИОННАЯ ПЕРЕДАЧА
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРЕЦИЗИОННОЙ МЕХАНИКЕ

ИЯФ 96-29

НОВОСИБИРСК
1996

Напряженная фрикционная передача и ее применение в прецизионной механике

Н.Г. Гаврилов, Б.П. Толочко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

Описан новый вид передачи для линейных и угловых перемещений – *напряженная фрикционная передача (НФП)*. Отличительными особенностями напряженной передачи являются беззазорность, малый шаг перемещений (линейных – с шагом до 0.01 мкм, угловых – 0.05''), плавная регулировка передаточного отношения, возможность передачи вращения и прямолинейного движения в вакуум.

Также рассмотрена напряженная фрикционная волновая передача (НФВП) и возможность ее использования в качестве прецизионного привода для угловых перемещений.

В работе показано, что прецизионность передачи обусловлена автоматической подстройкой передаточного отношения. Приведена формула зависимости передаточного отношения от конструктивных элементов передачи. Дано описание конструктивных вариантов НФВП для прецизионной механики.

N.G. Gavrilov, B.P. Tolochko

Stress friction transmission and its use in the precise instrument section

Abstract

The new type of linear and angular transmission (*stress friction transmission (SFT)*) is presented in the paper. There are some unique property of the SFT: no clearance, small step (angular – 0.05'', linear – 0.01 mkm), regulated transmission ratio, the possibility to transmit rotational and rectilinear motion into vacuum.

Also the stress friction wave transmission (SFWT) was examined in detail for the using as a high precision driver for angular moving.

It was shown that accuracy of the transmission is conditioned by the automatically adjusted transmission ratio. Formula of the "transmission ratio construction elements" is presented. A several design variants of the SFWT for precision technique are discribed.

e-mail: gavrilov@inp.nsk.su

1 Введение

С развитием экспериментов с использованием СИ, новых технологий, развитием ЛСЭ и т.д. появляется потребность в использовании механизмов поворота и линейных перемещений, имеющих прецизионную точность, с одной стороны, и надежность работы в высоком вакууме, с другой стороны.

Единственным надежным приводом для перемещений с очень малым шагом (0.1...0.01 мкм) является пьезокерамика. Механические передачи, за исключением фрикционной волновой передачи, не могут обеспечить такие малые перемещения, из-за ряда причин, ограничивающих возможности механических передач.

В фрикционных волновых передачах при их изготовлении неизбежны отклонения размеров, что приводит к большим погрешностям передаточного отношения.

Цель данной работы – рассмотрение преимуществ нового типа фрикционной передачи – *”НАПРЯЖЕННАЯ ПЕРЕДАЧА”* – на примере *”напряженной фрикционной волновой передачи”*.

2 Принцип работы волновой передачи

2.1 Фрикционная волновая передача (ФВП)

Волновая механическая передача основана на принципе передачи и преобразования движения путем волнового деформирования одного из звеньев механизма [1].

К специфическим особенностям передачи следует отнести высокую демпфирующую способность ввиду наличия гибких элементов и возможность передачи вращения или прямолинейного движения через непроницаемую перегородку, например, в вакууме.

Передача, как правило, состоит из трех кинематических звеньев (рис.1): гибкого колеса (2), жесткого колеса (4) и генератора волн (1).

На передаточное отношение i не влияет форма деформирования гибкого колеса,

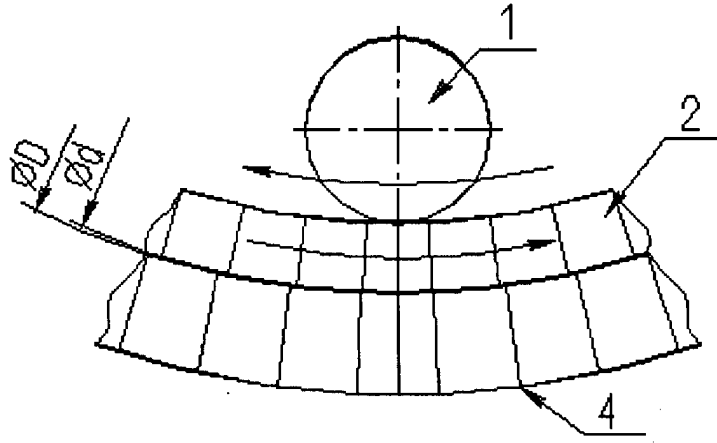


Рис. 1: Кинематическая схема фрикционной волновой передачи.

оно зависит только от разности диаметров колес [1] и

$$i = \frac{d}{D - d}, \quad (1)$$

где d – наружный диаметр внутреннего кольца; D – внутренний диаметр наружного кольца.

Это значит, что при неподвижном жестком колесе 4 (см. рис.1) за один оборот генератора 1, гибкое колесо 2 поворачивается в направлении, обратном вращению генератора (на рис.1 направление вращения генератора и гибкого колеса показано стрелками), на угол $\varphi = -2\pi(D - d)/d$.

Для фрикционных волновых передач со стальными гибкими колесами допускается $i_{min} \simeq 60$ по условию прочности, $i_{max} \simeq 1000$ по условию точности изготовления[1].

С учетом припуска на изготовление формула (1) примет вид:

$$i = \frac{d + \Delta_1}{(D + \Delta_2) - (d + \Delta_1)}, \quad (2)$$

где $\Delta_1; \Delta_2$ – допуски на изготовление внутреннего и наружного кольца.¹

При возможном допуске на изготовление 0,005мм на диаметре 100мм и заданном передаточном отношении $i = 1000$, получим $i_{max} = 1052,7$ и $i_{min} = 952,4$. Точность при повороте на 1° составит $\sim \pm 3'$.

Как видно, использование такой передачи в прецизионной механике из-за большой погрешности передаточного отношения не представляется возможным. Следует отметить, что формула (2) не совсем верна, так как гибкое колесо деформируется и в месте контакта диаметр d отличается от расчетного. Из-за малой величины деформации этот эффект можно не учитывать.

¹Оба допуски направлены на увеличение размера.

2.2 Напряженная фрикционная волновая передача (НФВП)

По кинематике НФВП похожа на ФВП. Поэтому можно написать, *напряженная передача основана на принципе передачи и преобразования движения путем волнового напряженного деформирования одного и БОЛЕЕ звеньев механизма.*

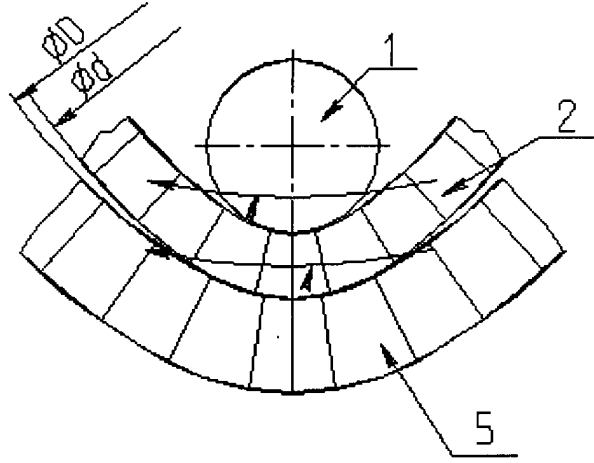


Рис. 2: Кинематическая схема напряженной фрикционной волновой передачи.

Главным отличием *НФВП от ФВП – передаточное отношение в основном зависит от величины деформации и гибкость неподвижного колеса 5 (см. рис.2), также влияет на передаточное отношение.* На рис.2 показано (на рисунке волокна показаны условно в виде секторов), что в месте контакта наружные волокна внутреннего кольца растягиваются, а внутренние волокна наружного кольца сжимаются. Передаточное отношение НФВП при передаче движения от генератора 1 к гибкому колесу 2 (рис.2 равно

$$i = \frac{d + \epsilon_1 d}{(D - d) - \epsilon_1 d - \epsilon_2 D} , \quad (3)$$

где d – наружный диаметр внутреннего кольца; D – внутренний диаметр наружного кольца; ϵ_1 – относительное удлинение наружной поверхности внутреннего кольца; ϵ_2 – относительное уменьшение внутренней поверхности наружного кольца; Δ_1 и Δ_2 – допуски на изготовление диаметров d и D (допуск направлен на увеличение диаметра и включает в себя, отклонение от цилиндричности, округлости).

Изменение деформации приводит к изменению передаточного отношения и при

$$(D - d) - \epsilon_1 d - \epsilon_2 D < 0 ,$$

вращение (рис.2) будет происходить в обратную сторону в сравнении с простой волновой передачей.

Так же отличительной особенностью НФВП является то, что при диаметрах равных бесконечности будем иметь напряженную передачу для прямолинейного движения, что невозможно получить в фрикционной волновой передаче.

Что же это такое *НАПРЯЖЕННАЯ ПЕРЕДАЧА*² и чем она отличается от существующих механических передач? В общем, это можно выразить так: *принцип действия напряженной фрикционной передачи (НФП) основан на создании разных по знаку напряжений (напряжений изгиба) в зоне контакта двух тел и при перемещении контакта происходит смещение одного тела относительно другого. Эти деформации позволяют управлять передаточным отношением в НФП, изменяя размеры (периметры колес или длины сопрягаемых звеньев) контактирующих тел.* Передаточное отношение напряженной передачи для общего случая равно

$$i = \frac{L}{\epsilon_1 \cdot L + \epsilon_2 \cdot L},$$

где L – расстояние, на которое переместился контакт; ϵ_1 – относительное удлинение первого тела в точке контакта; ϵ_2 – относительное сжатие второго тела в точке контакта.

НФВП конструктивно можно разделить: на передачи с малой редукцией $i = 2$ до 20 и с большой редукцией $i = 100$ до 2000.

К прецизионным относятся передача, в которой можно изменять редукцию от 60 до 2000. Минимальное значение $i_{min} \simeq 60$ по условиям упругих свойств металлических сплавов, $i_{max} \simeq 2000$ по условию чувствительности передачи.

Чувствительность НФВП в большей степени зависит от величины относительной деформации ϵ , которая в свою очередь зависит от конструкции передачи. Основное влияние на чувствительность передачи оказывают касательные напряжения возникающие в месте контакта колес.

В результате изгиба колец в месте контакта возникают касательные напряжения τ , направление которых совпадают с направлением вращения гибкого колеса. Приблизительно (когда толщины колец приблизительно одинаковые) касательные напряжения можно оценить по формуле [2]

$$\tau = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot b \cdot h},$$

где Q – приложенная сила; b – ширина кольца; h – суммарная толщина двух колец.

Касательные напряжения значительные и это говорит о том, что передача может работать даже в случае, когда наружное кольцо установлено на внутреннее кольцо с небольшим натягом.³

Представим себе балку из двух одинаковых брусков прямоугольного сечения, положенных друг на друга, ширина бруса – b ; толщина бруса – $\frac{h}{2}$. Предположим что эта балка изгибается силой Q , приложенной посередине пролета. Балка искривиться, нижние волокна верхнего бруска растянутся, а верхние волокна нижнего бруска укоротятся. Если же балка является целым брусом, то она изогнется, но волокна

²Название дано авторами.

³Этот эффект возникает в подшипниковых узлах, когда корпус, куда установлен подшипник, имеет тонкую стенку и под нагрузкой стенка деформируется. Между стенкой и наружным кольцом возникает напряженная передача, которая будет вращать наружное кольцо подшипника.

окажутся в нейтральном слое и не изменят своей длины. Следовательно, при изгибе цельной балки от верхней половины балки на нижнюю и обратно по нейтральному слою будут передаваться касательные напряжения τ , удерживающие верхнюю и нижнюю половины балки от сдвига по нейтральному слою. Касательные напряжения в продольных сечениях являются выражением существующей связи между слоями балки при поперечном изгибе. Если эта связь в некоторых слоях нарушена, характер изгиба балки меняется (как с балкой состоящей из двух брусков или целой).

Кроме касательных напряжений, при изгибе балки состоящей из двух брусков, по плоскости прилегания брусков возникают силы трения, направленные на увеличение жесткости балки, т.е. против взаимной деформации волокон.

В напряженных передачах в месте контакта, когда площадью контакта является прямоугольник, также возникают касательные напряжения и силы трения. Ширина прямоугольника контакта зависит от передаточного отношения и конструкции передачи. В данной работе эти вопросы не рассматриваются, но заметим, что от ширины прямоугольника контакта и зависит чувствительность передачи.

2.3 Зависимость передаточного отношения от параметров передачи

При деформации кольца [3] радиальное перемещение точки приложения силы от центра

$$\lambda = \frac{\alpha PR^3}{EI}, \quad (4)$$

где α – коэффициент; зависящий от количества точек приложения сил (количества волн), равномерно расположенных по окружности (так для двухволновой передачи $\alpha = 0.0744$); P – приложенная сила; R – средний радиус кольца; EI – жесткость кольца.

Коэффициент α в зависимости от количества волн определяется по формуле [3]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{\beta}{2} + \frac{\sin 2\beta}{4} \right) - \frac{1}{\beta} \right],$$

где

$$\beta = \frac{\pi}{N},$$

N – количество волн.

Изгибающий момент в точке приложения силы [3]

$$M = \chi PR,$$

где χ – коэффициент, зависящий от количества точек приложения сил, равномерно расположенных по окружности (при двухволновой передаче $\chi = 0.3183$).

Коэффициент χ в зависимости от количества волн определяется по формуле [3]:

$$\chi = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sin \beta} - \frac{1}{\beta} \right),$$

где

$$\beta = \frac{\pi}{N}.$$

Подставим в формулу (4) изгибающий момент и заменим I (момент инерции) через момент сопротивления сечения W , т. е.

$$I = WS/2 ,$$

где S – толщина стенки кольца, получим

$$\lambda = \frac{2\alpha MR^2}{\chi EWS} . \quad (5)$$

Обозначим

$$\frac{\alpha}{\chi} = \gamma$$

и заменим

$$M/W = \sigma ,$$

где σ – напряжения в точке приложения силы.

Далее, заменим $\sigma/E = \epsilon$ – относительная деформация в точке приложения силы, формула (5) примет вид

$$\lambda = \frac{2\gamma\epsilon R^2}{S} . \quad (6)$$

Следовательно,

$$\epsilon_1 = \frac{\lambda_1 S_1}{2\gamma R_1^2} \quad (7)$$

и

$$\epsilon_2 = \frac{\lambda_2 S_2}{2\gamma R_2^2} , \quad (8)$$

где λ_1 – радиальное перемещение внутреннего кольца от приложенной силы; λ_2 – радиальное перемещение наружного кольца от приложенной силы; S_1 – толщина стенки внутреннего кольца; S_2 – толщина стенки наружного кольца; R_1 – средний радиус внутреннего кольца; R_2 – средний радиус наружного кольца; γ – коэффициент, зависящий от количества волн в передаче.

Зависимость коэффициента γ от количества (N) волн:

N	2	3	4	6
γ	0.234	0.0785	0.0445	0.0189

Зависимость передаточного отношения от параметров передачи или формула (3) примет вид

$$i = \frac{d + \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot d}{2 \cdot \gamma \cdot R_1^2}}{(D - d) - \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot d}{2 \cdot \gamma \cdot R_1^2} - \frac{\lambda_2 \cdot S_2 \cdot D}{2 \cdot \gamma \cdot R_2^2}} . \quad (9)$$

Из формулы (9), если

$$(D - d) - \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot d}{2 \cdot \gamma \cdot R_1^2} - \frac{\lambda_2 \cdot S_2 \cdot D}{2 \cdot \gamma \cdot R_2^2} < 0$$

следует:

- уменьшение γ (изменение числа волн) уменьшает передаточное отношение;
- увеличение деформации λ , также приводит к уменьшению передаточного отношения.

Следовательно, изменением величины γ (при сохранении других параметров передачи) получаем ступенчатый редуктор, а изменением деформации λ – бесступенчатый редуктор с плавной регулировкой передаточного отношения и комбинация γ и λ – комбинированный редуктор.

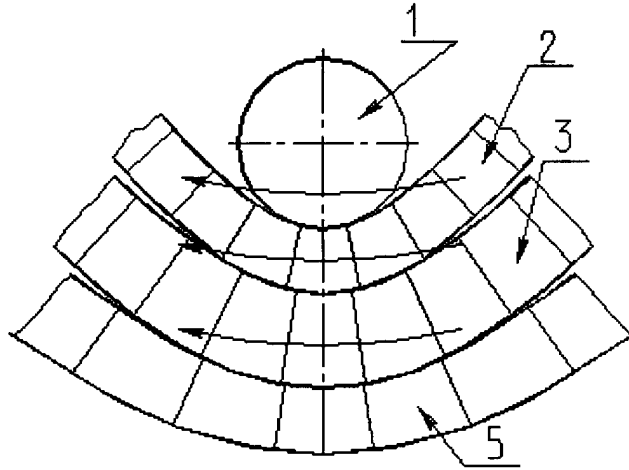


Рис. 3: Кинематическая схема напряженной фрикционной волновой передачи с тремя гибкими элементами.

И, в заключение, о НФВП, более чем с двумя гибкими элементами. На рис.3 приведена схема с тремя гибкими элементами, где два колеса (поз.2 и поз.3) подвижных и одно колесо (поз.5) неподвижное).

Передаточное отношение гибкого колеса 2 (рис.3)

$$i_2 = \frac{i_2' \cdot i_3}{i_2' + i_2},$$

где i_2' – передаточное отношение гибкого колеса 2, когда гибкое колесо 3 – неподвижное (рис.3); i_3 – передаточное отношение гибкого колеса 3.

НФВП с тремя гибкими элементами очень удобно использовать в механизмах, где требуется два согласованных поворота с различными углами от одного привода.

И, когда имеем n гибких элементов, то передаточное отношение гибкого колеса -1

$$\frac{1}{i_1} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{i_k}.$$

3 Возможные применения

1. Прецизионное угловое перемещение в большом диапазоне, в сравнении с пьезо-керамическим приводом. Передача позволяет поворот на любой угол с очень малым шагом. В работе [5] проведенные измерения показали стабильность поворота с шагом 0.1”.

2. Прецизионное линейное перемещение с малым шагом на большое расстояние. Свои преимущества имеет напряженная передача в прецизионных линейных перемещениях. Так, напряженная передача для прямолинейного движения при габаритном размере 50мм, обеспечит ход 0.2мм с шагом 0.01мкм, что невозможно получить пьезо-керамическим приводом при одинаковых габаритах. Увеличение хода возможно с увеличением габаритных размеров привода.

3. Передача прецизионного вращения и линейного движения в вакуум.

Специфическими особенностями передачи следует отнести возможность передачи вращения или прямолинейного движения через непроницаемую перегородку.

4. Привод на принципе напряженной передачи может служить альтернативой пьезо-керамическому приводу.

5. Бесступенчатый редуктор (вариатор) с плавной регулировкой частоты вращения.

Реально возможно изготовление редуктора с десятикратным плавным изменением частоты вращения.

3.1 Прецизионность передачи

Сущность прецизионности передачи в следующем:

1. При обкатывании внутренним кольцом внутренней поверхности наружного кольца внутреннее кольцо повторяет точный контур внутренней поверхности наружного кольца, но при этом изменяется величина ϵ_1 в зависимости от погрешностей изготовления передачи, сохраняя неизменным передаточное отношение. Формула (3) с учетом припуска на изготовление самой передачи и без учета погрешностей второго порядка⁴ примет вид:

$$i = \frac{(d + \Delta_1) + \epsilon_1(d + \Delta_1) - \epsilon'_1(d + \Delta_1)}{(D - d) - \Delta_1 + \Delta_2 - \epsilon_1(d + \Delta_1) - \epsilon_2(D - \Delta_2) - \epsilon'_1(d + \Delta_1)}, \quad (10)$$

где ϵ'_1 – дополнительная относительная деформация внутреннего кольца, связанное с компенсацией погрешностей изготовления.

Из условий прецизионности передачи

$$\epsilon'_1(d + \Delta_1) = \Delta_2 - \Delta_1, \quad (11)$$

⁴Погрешности от неточности изготовления внутреннего диаметра внутреннего кольца и наружного диаметра наружного кольца, влияние которых на два порядка меньше

но $\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2}$ – дополнительное радиальное перемещение кольца, связанное с погрешностью изготовления, отсюда следует,

$$\epsilon_1' = \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)(S_1 + \frac{\Delta_1}{2})}{\gamma(R_1 + \frac{\Delta_1}{2})^2}, \quad (12)$$

где S_1 – толщина стенки внутреннего кольца; R_1 – средний радиус внутреннего кольца, γ – коэффициент; зависящий от количества волн в передаче; $\Delta_2 - \Delta_1$ – радиальное перемещение, связанное с погрешностями изготовления диаметров, d и D .

Не трудно убедиться — условие прецизионности по формуле (11) будет выполняться при

$$\frac{dS_1}{\gamma R_1^2} = 1. \quad (13)$$

То есть передача будет работать с автоматической подстройкой, сохраняя постоянным передаточное отношение.

Формула (10) примет вид

$$i = \frac{(d + \Delta_1) + \epsilon_1(d + \Delta_1) + \Delta_1 - \Delta_2}{(D - d) - \epsilon_1(d + \Delta_1) - \epsilon_2(D - \Delta_2)}. \quad (14)$$

Из кинематики НФВП с двумя гибкими звеньями можем иметь три варианта передачи:

1. Наружное неподвижное колесо деформируется на очень малую величину (неподвижное колесо жесткое), необходимую только для подстройки передаточного отношения. Здесь имеем ФВП с элементом НФВП, который будет служить прецизионным звеном и формула (14) примет вид

$$i = \frac{(d + \Delta_1) + \epsilon_1(d + \Delta_1) + \Delta_1 - \Delta_2}{(D - d) - \epsilon_1(d + \Delta_1)}. \quad (15)$$

При допуске на изготовление 0,005мм на диаметре 100мм и заданном передаточном отношении $i=1000$ получим $i_{max} = 1000.05$ и $i_{min} = 999.95$. Точность передачи при повороте на 1° составит $\sim \pm 0.5''$. Как видно, точность передачи увеличилась приблизительно в 360 раз. Увеличение точности, при повороте на 360° , можно добиться подстройкой передаточного отношения.

2. Жесткость неподвижного колеса соизмерима или равна жесткости гибкого колеса. В этом случае следует рассматривать и конструкцию генератора как элемент прецизионной передачи.

3. Жесткость неподвижного колеса в несколько раз меньше жесткости гибкого колеса. В этом варианте прецизионность передачи в большей степени зависит от конструкции генератора.

Величина точности передаточного отношения у НФВП зависит только от точности настройки ее во время сборки.

Основным недостатком фрикционных передач является невозможность получения абсолютно точных передаточных отношений вследствие проскальзывания и неизбежных погрешностей диаметров тел качения[4].

В НФВП неточность изготовления компенсируется регулировкой передаточного отношения и явление проскальзывания в НФВП из-за автоматической компенсации погрешностей отсутствует.

3.2 Надежность

Долговечность работы при возможности контроля и регулировки передачи в процессе эксплуатации. Согласно формуле (14), внутришаговая погрешность НФВП отсутствует или она очень мала. Поэтому контроль передачи можно осуществить по накопленной погрешности на определенном угле. Установка двух датчиков, расположенные под измеренным с высокой точностью углом, позволит контроль механизма в процессе эксплуатации.

Заключение

Вышеизложенный материал является полностью теоретическим и судить о работе передачи только по этим результатам очень сложно. Для проверки работоспособности привода был изготовлен прототип. В конструкции механизма заложены регулировочные элементы, с помощью которых можно изменять передаточное отношение, что и было осуществлено на первом этапе проверки привода. Результаты подтвердили правильность теории.

Литература

- [1] *К.Е. Анзин, Л.С. Бойко М.Н. Иванов, В.А. Финогенов, А.А. Чиров.* Волновые передачи. *Рекомендации по инженерным расчетам.* ВНИИТЕМП, Москва, 1986.
- [2] *Н.М. Беляев.* Сопротивление материалов. Москва, Наука, 1976.
- [3] *Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев.* Справочник по сопротивлению материалов. Киев, Наукова Думка, 1988.
- [4] *Д.Н. Решетов.* Детали машин. Москва, 1963.
- [5] *N.G. Gavrilo, O.V. Evdokov.* Wave Transmission, High Precision (0.05^o) Rotation Stage for Synchrotron Radiation Instrumentation. Abstract book of Synch. Rad. Instr. Conference (SRI-94), Brookhaven, NSRL, 1994, TuD24.

Н.Г. Гаврилов, Б.П. Толочко

**Напряженная фрикционная передача
и ее применение в прецизионной механике**

N.G. Gavrilov, B.P. Tolochko

**Stress friction transmission and
its use in the precise instrument section**

ИЯФ 96-29

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 16.04. 1996 г.

Сдано в набор 13.05.1996 г.

Подписано в печать 13.05.1996 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 29

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.