

ке методик расчёта линейных передач на основе УСП, так как применение данных передач позволит существенно увеличить дискретность и точность позиционирования по сравнению с РВП, ВВП и ШВП.

Библиографические ссылки

1. Пат. РФ № 2451220. F16H 25/22//F16B 33/02. Планетарная роликовинтовая передача с модифицированной резьбой роликов / Д. А. Блинов, В. И. Мафтер, А. Я. Ляпунов и др. Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
2. Пат. США № 1831080. Шариковинтовая передача / Б. Ф. Шмидт. Оpubл. 10.11.1931.
3. Пат. США № 29779964. Прецизионный линейный привод / К. В. Массер. Оpubл. 18.04.1961.
4. Пат. США № 5969892. G02B 7/182. Редуктор с гибкой структурой / Р. Б. Слэшер. Оpubл. 19.10.1999.
5. Козырев В. В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования : учеб. пособие / Владимирский гос. ун-т. Владимир, 2004. 100 с.
6. Блинов Д. С. Разработка научно-методических основ расчета и проектирования планетарных роликовинтовых механизмов, имеющих многочисленные избыточные связи : дис. ... д-ра техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
7. Турышев В. А., Василенко Н. В. Волновые передачи в линейном приводе и приводе повышенной точности для работы в специальных условиях (вакууме) : отчет о науч.-исслед. Работе / Красноярский политех. ин-т, 1980.

References

1. Blinov D. A., Mafter V. I., Ljapunov A. Ja., Frolov A. V., Starkov Ju. A., Laptev I. A., Kulish A. V. Patent № 2451220 Russian Federation, F16H 25/22//F16B 33/02. Planetary roller screw with modified roller thread. Pub. 20.05.2012. Bull. №14.
2. Schmidt B. F. Patent № 1831080 USA. Ball bearing screw and nut. Pub. 10.11.1931.
3. Musser C. W. Patent № 2979964 USA. Microlinear actuator. Pub. 18.04.1961.
4. Slusher R. B. Patent № 5969892 USA, G02B 7/182. Motion reducing flexure structure. Pub. 19.10.1999.
5. Kozyrev V. V. *Konstrukcii rolikovintovykh peredach i metodika ih proektirovaniya* (Roller screw design and development methods). Tutorial. Vladimir State University, Vladimir, 2004. 100 p.
6. Blinov D. S. *Razrabotka nauchno-metodicheskikh osnov raschjota i proektirovaniya planetarnykh rolikovintovykh mehanizmov, imejushhih mnogochislennye izbytochnye svyazi* (Calculation and design methodology of planetary roller screws with numerous redundant constraints development). Doctoral thesis, MGTU named after N. E. Bauman, Moscow, 2007.
7. Turyshev V. A., Vasilenko N. V. *Volnovye peredachi v linejnom privode i privode povyshennoj tochnosti dlja raboty v special'nykh uslovijah (vakuume)* (Harmonic drives in linear actuator and precision actuator for special terms application (vacuum)). Research record, Krasnoyarsk Polytechnic Institute, Krasnoyarsk, 1980.

© Бойко С. О., Комаров С. А., Харитонов С. Г., Улыбушев Е. А., Леканов А. В., 2013

УДК 629.735.33.015.4: 534

КОНТРОЛЬ ЗАЗОРОВ В ПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В. А. Бернс, А. В. Долгополов

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20. E-mail: v.berns@yandex.ru

Зазоры в подвижных соединениях механизмов и систем передачи усилий или перемещений приводят к расхождению между управляющим сигналом и реакцией объекта управления на этот сигнал. Поэтому повышенные зазоры являются дефектами этих конструкций. В настоящей работе решается задача контроля таких зазоров по результатам резонансных испытаний механизмов и систем. Это позволяет осуществлять выявление дефектов без разборки конструкции и последующего инструментального контроля размеров ее деталей. Для выявления дефектов в местах соединений устанавливаются датчики ускорений. В окрестности частоты фазового резонанса объекта контроля по сигналам датчиков строятся фигуры Лиссажу, которые для идеальной системы являются эллипсами. Наличие зазоров в соединениях определяется по отклонениям фигур Лиссажу от эллиптической формы. Дефектным соединениям соответствуют максимальные отклонения фигур Лиссажу. Получены формулы для оценки величин зазоров по характерным значениям резонансных частот. Эффективность разработанной методики иллюстрируется на примере контроля люфтов в механической проводке управления самолетом Су-34. Эта методика может использоваться в контроле трансмиссий вертолетов и автомобилей, механических проводок управления летательными аппаратами.

Ключевые слова: подвижные соединения, зазор, резонансные испытания, контроль.

GAPS CONTROL IN MOVABLE JOINTS BY THE RESULTS OF RESONANCE TEST

V. A. Berns, A. V. Dolgoplov

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks prosp., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: v.berns@yandex.ru

Gaps in mobile connections of mechanisms and effort transfer systems or movements lead to a mismatch between operating signal and reaction of the controlled object to this signal. Therefore the extended gaps become the defects of these structures. In this work the authors solve the problem of such gaps control by results of mechanisms resonant testing and systems. It allows to carry out defects detection without the structure dismantling and the subsequent instrumental inspection of its details sizes. The accelerations sensors are installed in connections places for defects detection. In a vicinity of the phase resonance frequency of the object control by the signals of sensors there constructed the Lissazhu figures, which are ellipses for ideal system. The gaps existence in connections is determined by deviations of Lissazhu figures from the elliptic form. The maximum deviations of Lissazhu figures correspond to the defective connections. Formulas for the assessment of gaps sizes by characteristic values of resonant frequencies are received. The efficiency of the developed technique is illustrated on the gaps control example in mechanical control wiring by the Su-34 plane. This technique can be used in the transmissions control of helicopters and cars, aircrafts mechanical control wiring.

Keywords: mobile connections, gap, resonance test, control.

Повышенные зазоры в подвижных соединениях механизмов и систем передачи усилий или перемещений, например, таких как трансмиссии вертолетов и автомобилей, механические проводки управления летательных аппаратов могут являться как следствием нарушения технологий их изготовления, так и результатом длительной эксплуатации. Наличие таких зазоров затрудняет управление летательным аппаратом и автомобилем, является причиной возникновения автоколебательных режимов, приводит к ухудшению аэроупругих характеристик самолетов. Зазоры, конечно же, контролируются, но известные методы предполагают, как правило, частичную разборку объекта контроля.

Как показали результаты исследований, проведенных в работах [1; 2], контроль зазоров в подвижных соединениях возможен и в резонансных испытаниях объектов контроля. В этих испытаниях при возбуждении колебаний объекта предложено фиксировать перегрузки всех его элементов в местах их соединений с построением фигур Лиссажу. Для построения фигуры Лиссажу вертикальная развертка производится пропорционально сигналу датчика ускорений « n », а горизонтальная – пропорционально гармонике возбуж-

дающей силы U . Такая фигура на резонансе линейной системы является эллипсом.

По нелинейным искажениям фигур Лиссажу определяются дефектные соединения. На рис. 1 показан пример фигуры Лиссажу для соединения без зазора и соединения с зазором. Для численной оценки искажений используется преобразование Фурье применительно к развертке фигуры Лиссажу. Затем выделяется первая гармоника и вычитается из полного сигнала, а в остатке определяется абсолютный максимум искажений за период. Этот максимум относился к амплитуде первой гармоники, и величина отношения обозначается как ξ . Определение дефектного соединения основано на том, что значение ξ в соединении с дефектом значительно превышает значения этого параметра в других соединениях.

В качестве примера рассмотрим определение места положения люфта в проводке управления самолета Су-34 [1; 2]. Проводка представляет собой систему качалок, последовательно соединенных между собой тягами. В соединениях, между которыми возможен зазор, т.е. люфт. На рис. 2 изображена схема проводки управления с обозначением номеров узлов.

В табл. 1 показан пример локализации люфта, расположенного в узле номер шесть.

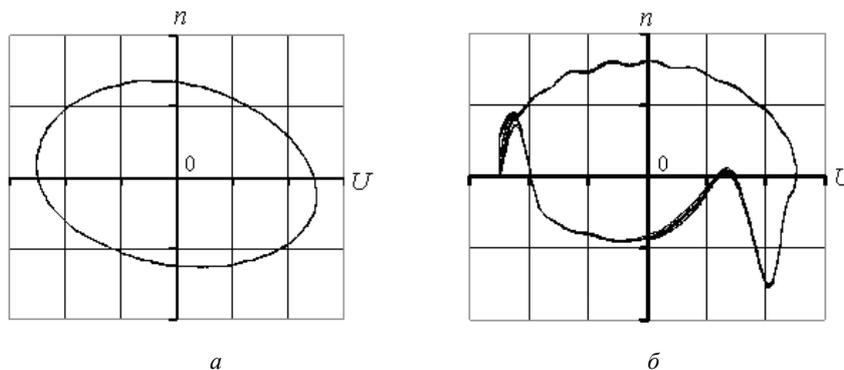


Рис. 1. Фигура Лиссажу до (а) и после появления зазора (б)

Локализация люфта

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7	8
ξ	10,42	8,82	5,99	26,28	9,83	101,62	59,67	43,64

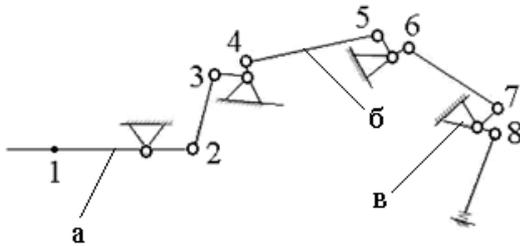


Рис. 2. Схема проводки управления:
а – отклоняемая поверхность; б – тяга; в – качалка

Следующей задачей является оценка величины зазора. Для оценки величины зазора приняты следующие допущения:

- объектом исследования является механическая система, представляющая собой цепочку последовательно соединенных между собой упругих элементов, связывающих два объекта: объект, создающий передаваемое усилие и (или) перемещение, и объект, воспринимающий передаваемое усилие и (или) перемещение (основной инерционный элемент); в соединениях между упругими элементами возможны зазоры;

- соударение элементов в зазоре является абсолютно неупругим;

- основной инерционный элемент имеет обобщенную массу, значительно превышающую массу каждого элемента цепочки;

- объект, создающий передаваемое усилие и (или) перемещение упруго или жестко зафиксирован;

- в системе присутствует статическое усилие, при преодолении которого происходит мгновенное перемещение основного инерционного элемента на суммарную величину зазоров во всех соединениях.

Отметим, что в реальных конструкциях масса объекта, воспринимающего передаваемое усилие и (или) перемещение, может не быть преобладающей. В этом случае эта масса увеличивается искусственно установкой дополнительного груза. Кроме того, в системе необходимо создать усилие, введением статической составляющей в силу возбуждения (это позволяет реализовать, например, электродинамический силовозбудитель), а для горизонтально отклоняющихся поверхностей на время испытаний можно изменить статическую балансировку.

В резонансных испытаниях используется гармоническое возбуждение колебаний; прикладываемое к основному инерционному элементу. С учетом принятых допущений в такой механической системе колебания основного инерционного элемента при гармоническом возбуждении происходят по гармоническому закону.

Далее строится нелинейная математическая модель механической системы с дефектом, параметры

которой, а то есть и величины зазоров, определяются по результатам резонансных испытаний. Такой математической моделью является система с одной степенью свободы с нелинейной характеристикой жесткости.

Представив квадрат резонансной частоты колебаний как отношение изменения потенциальной и кинетической энергий за период, получаем соотношение:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 1 + \frac{2}{\pi} \left\{ \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{2} \right) (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{1}{4} (\sin 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1) - 2 \frac{d}{a} \cos \varphi_2 + \left(\frac{d}{a} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2 \right) \right\},$$

где ω – частота фазового резонанса (частота, при которой сдвиг фазы перемещений относительно фазы вынуждающей силы составляет $\pi/2$); ω_0 – собственная частота системы без зазора; $a = A/A_0$ – отношение резонансной амплитуды A основного инерционного элемента к амплитуде колебаний, при которой преодолевается статическое усилие в системе A_0 ; $d = \tau\delta/A_0$ – относительный зазор; τ – отношение перемещения дефектного узла к перемещению контрольной точки основного инерционного элемента; δ – величина зазора; $\varphi_1 = \arcsin(1/a)$; $\varphi_2 = \arcsin((1+d)/a)$.

Используя линейную аппроксимацию зависимости относительного зазора от изменения относительного значения частоты получим формулу для оценки величины зазора [2]:

$$\tau\delta = 3,5 A_0 \left(1 - \frac{\omega_e}{\omega_0} \right), \quad (1)$$

где ω_e – минимальное значение частоты фазового резонанса

Линейная аппроксимация практически совпадает с исходной зависимостью, если падение резонансной частоты из-за зазора не превышает 6 %. При этом амплитуда свободного хода основного инерционного элемента может достигать 20 % от величины A_0 .

В случае, если падение резонансной частоты из-за зазора превышает 6 %, то для определения величины зазора можно воспользоваться следующей формулой:

$$\tau\delta = A_0 \left[1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0} \right)^2 \right] \left\{ 4,2027 \left[1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0} \right)^2 \right] + 1,388 \right\}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет вычислять величину зазора с достаточной точностью при падении резонансной частоты до 12 % и величинах относительного зазора до 50 %.

Оценку величины зазора рассмотрим на примере контроля люфтов в проводке управления самолета Су-34. Для оценки величины люфта воспользуемся

экспериментально полученной зависимостью резонансной частоты от амплитуды колебаний органа управления (рис. 3).

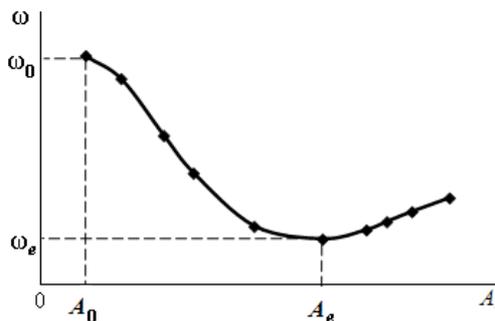


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты системы с люфтом от амплитуды колебаний

В этой зависимости выделяются две точки: точка, где начинает проявляться люфт, то есть начинает убывать резонансная частота, и точка, где частота перестает убывать. Амплитуды и фазовые частоты в этих точках обозначены как A_0 , ω_0 и A_e , ω_e соответственно.

В табл. 2 показаны результаты вычисления люфтов различных величин, с погрешностью не превышающей 10 %. Оценка величины зазора имеет ряд особенностей. Например, чтобы определить резонансную частоту отклоняемой поверхности после раскрытия зазора необходимо поменять направление изменения частоты вынуждающей силы от большей к меньшей (обратный ход) [1]. При таком изменении частоты определяется частота фазового резонанса ω_e на новой резонансной кривой. Пример резонансной кривой (действительная составляющая перегрузки органа управления) представлен на рис. 4.

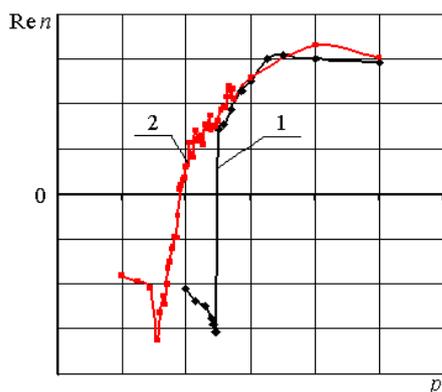


Рис. 4. Действительная составляющая перегрузки органа управления:
1 – прямой ход; 2 – обратный ход

Если в системе управления присутствует несколько зазоров, то по формуле (1) вычисляется суммарная величина зазора, а выявление дефектных узлов и определение зазоров в этих узлах производится по величинам параметра ξ .

Анализ динамики системы с зазором показал (рис. 5), что если амплитуда колебаний основного инерционного на обратном ходе превышает амплитуду A_0 на 40...60 %, а величина относительного зазора d находится в диапазоне 0,2...0,3, то частота ω_e определяется с достаточной точностью для вычисления величины зазора с погрешностью не выше 10 %.

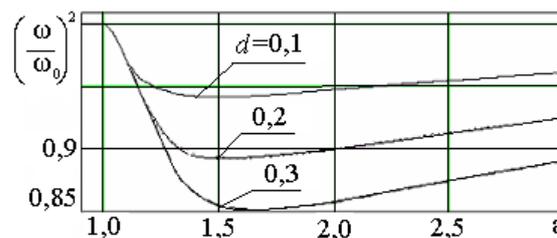


Рис. 5. Расчетные зависимости между относительной частотой и относительной амплитудой колебаний

В работах [1; 2] отмечено, что искажения фигур Лиссажу растут с удалением узлов системы от основного инерционного элемента не только из-за наличия зазоров, но и из-за сухого трения в подвижных соединениях механической системы. Это обстоятельство затрудняет идентификацию дефекта в удаленных узлах в протяженных системах.

Для повышения достоверности локализации зазоров в узлах, удаленных от основного инерционного элемента, необходимо в системе создать второй инерционный элемент, установив на объект, создающий передаваемое усилие и (или) перемещение, некоторую добавочную массу [3]. Величина этой массы определяется из условия, что оба инерционных элемента должны иметь сопоставимые обобщенные массы. Кроме того, возбуждение колебаний системы производится поочередно с основного и добавочного инерционного элемента. Это приводит к тому, что:

- искажения фигур Лиссажу в узлах, находящихся после дефектного узла вдали от основного инерционного элемента, практически не затухают независимо от места возбуждения колебаний;
- установка дополнительной массы в совокупности с приложением возбуждающей силы к добавочному инерционному элементу позволяет значительно повысить эффективность выявления дефектных узлов системы, удаленных от основного инерционного элемента;
- уровни погрешностей в оценках величин зазоров не зависят от выбора точки возбуждения.

Таблица 2

Оценка величины люфта

№ узла	3	3	3	4	4	6	6	3, 6
Истинный люфт (мкм)	20	43	50	35	50	35	50	30+50
Вычисленный люфт(мкм)	22	49,0	46,5	38,3	52,6	35,3	47,3	74,0

В результате проведенных исследований предложен метод локализации и оценки величин зазоров в подвижных соединениях механизмов и систем передачи усилий по результатам резонансных испытаний. На примере контроля люфтов в проводке управления самолета установлены особенности идентификации зазоров и показана эффективность разработанного метода.

Библиографические ссылки

1. Способ контроля люфтов в механических проводках управления самолетов / А. П. Бобрышев, В. А. Бернс, В. Л. Присекин и др. // Полет. 2007. № 12. С. 50–53.
2. Бернс В. А., Белоусов А. И., Самуйлов В. Ф. Контроль люфтов в проводках управления летательных аппаратов по результатам резонансных испыта-

ний отклоняемых поверхностей // Техника воздушно-го флота. 2010. Т. LXXXIV, № 1 (698). С. 15–19.

3. Бернс В. А., Долгополов А. В. Особенности контроля люфтов в протяженных проводках управления самолетов // Наука. Промышленность. Оборона : тр. XIII всерос. науч.-пром. конф. 2012. С. 77–80.

References

1. Bobryshev A. P., Burns V. A., Prisekin V. L., Belousov A. I., Samuylov V. F. *Polet*, 2007, № 12, p. 50–53.
2. Burns V. A., Belousov A. I., Samuylov V. F. *Tekhnika vozdušnogo flota*. 2010, vol. LXXXIV, № 1 (698), p. 15–19.
3. Burns V. A., Dolgoplov A. V. *Tr. XIII vseros. nauch.-prom. konf. "Nauka. Promyshlennost'. Oborona"* (Works XIII of the All-Russian scientific and industrial conference "Science. Industry. Defense"). 2012, p. 77–80.

© Бернс В. А., Долгополов А. В., 2013

УДК 629.7.02

УСТРОЙСТВО ОТДЕЛЕНИЯ ДЛЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ПЛАТФОРМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА БАЗЕ ИЗОГРИДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. С. Вехов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: vas304@mail.ru

Представлено новое конструктивное решение устройства отделения для негерметичных платформ с силовой конструкцией корпуса из изогридной углепластиковой структуры. Для разработки нового устройства отделения проведены анализы конструкции по оптимальной массе, по параметрам отделения, надежности при худших условиях эксплуатации и т. д. В результате разработано УО исключаящее дополнительные проставки и стыковки, стягивающее шпангоуты адаптера и силовой конструкции корпуса в 12-ти равномерно расположенных по окружности точках (механических замках). Сконструированное устройство отделения позволяет унифицировать конструкцию входящих элементов и применить различные компоновки (кол. Замков, пружин толкателя). Устройство отделения имеет лучшие характеристики в сравнении с зарубежными аналогами в зависимости от массовой конструкции выводимого космического аппарата. На данный момент конструкция устройства отделения успешно применена на космическом аппарате «Атос-5», «Telkom-3», «Ямал-300К», «Луч-5Б».

Ключевые слова: космический аппарат, силовая конструкция корпуса, устройство отделения.

SEPARATION DEVICE FOR SPACECRAFT UNPRESSURIZED PLATFORMS BASED ON ISOGRID STRUCTURES

A. S. Vehov

JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: vas304@mail.ru

Design solution of the separation device for spacecraft unpressurized platforms with foundation central tube based on isogrid carbon structure is presented. The structure analysis based on the optimal mass, separation parameters, reliability under the worst operational conditions, etc. was performed for the new launch adapter. As a result, the new launch adapter was developed, which allows to eliminate additional spacers and interfaces, tightening frames for adapter and load-bearing structure at 12 uniformly spaced points on the circle (mechanical locks). The designed launcher adapter allows to unify the structure of incoming elements and to use different configurations (of locks,