

О. П. Прудников, С. В. Тюлевин, Д. В. Назаров

МЕТОДИКА И КРИТЕРИИ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВодОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предлагается методика селективной сборки волновых зубчатых передач приводов солнечных батарей, использующая пять критериев для оценки геометрии и взаимной сопрягаемости элементов передачи. Описаны эти критерии, их расчет и результаты практического использования.

Ключевые слова: привода солнечных батарей, волновые передачи, селективная сборка, критерии, технологический процесс.

В силу известных своих достоинств волновые зубчатые передачи (ВЗП) нашли широкое применение в космической технике. Однако они требуют высокой точности изготовления составных элементов и сборки. Отсутствие каких-либо критериев, которыми необходимо руководствоваться при сборке ВЗП не гарантирует получение работоспособной передачи.

В работе для практического использования при оценке геометрии зацепления с целью селективной сборки ВЗП приводов солнечных батарей КА предлагается пять критериев: расчетные (коэффициент зацепления и зазор по малой полуоси) и технологические (посадка кулачка и гибкого колеса, степень совпадения высот зубьев, качество изготовления («гладкость») кулачка).

Геометрия зацепления ВЗП, состоящей из элементов: кулачка (К), гибкого подшипника (ГП), гибкого

колеса (ГК), жесткого колеса (ЖК), представлена схематически на рис. 1. Вертикально расположена большая полуось ВЗП, горизонтально – малая.

Рассмотрим формирование указанных критериев.

1. Коэффициент зацепления характеризует эффективность использования высот зубьев ГК и ЖК для передачи усилия:

$$K_3 = (R_{\text{ЖК}} - \rho_{\text{сб. max}}) / H_{\text{ЖК}}$$

Его рекомендуемое численное значение $K_3 = 0,5-0,7$.

Расчетный радиус-вектор сборки вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{сб. max}} = \rho_{\text{К max}} + W_{\text{ГП}} + \Delta_{\text{ГК}}$$

или

$$\rho_{\text{сб. max}} = \rho_{\text{К max}} + (D_{\text{ГПнар}} - D_{\text{ГПвн}}) / 2 + (D_{\text{ГКнар}} - D_{\text{ГКвн}}) / 2.$$

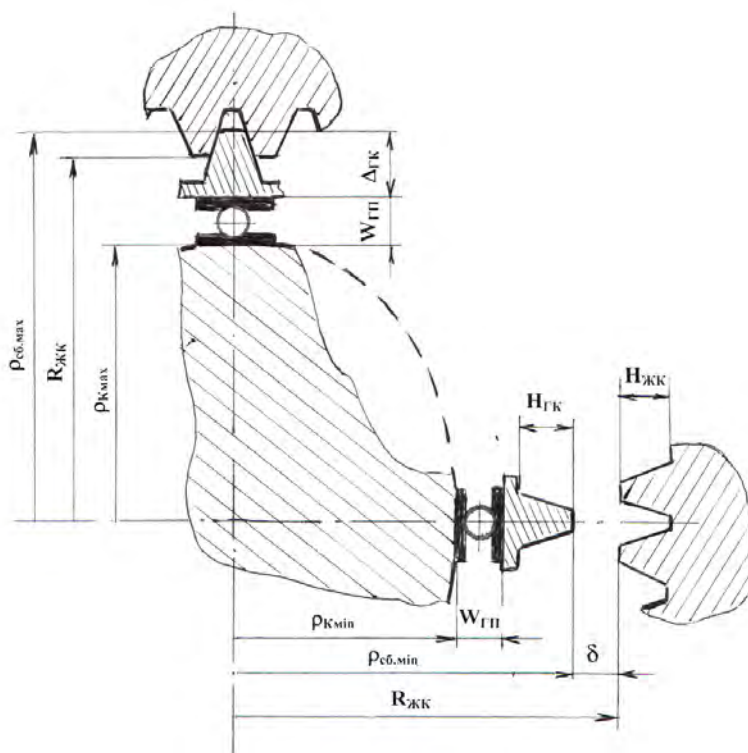


Рис. 1. Геометрия зацепления волновой передачи:

$\rho_{\text{К max}}$ и $\rho_{\text{К min}}$ – большая и малая полуоси кулачка; $W_{\text{ГП}}$ – толщина ГП; $\Delta_{\text{ГК}}$ – толщина ГК; $R_{\text{ЖК}}$ – радиус ЖК; $\rho_{\text{сб. max}}$ и $\rho_{\text{сб. min}}$ – большая и малая полуоси сборки «К-ГП-ГК»; $H_{\text{ГК}}$ и $H_{\text{ЖК}}$ – высота зубьев ГК и ЖК

2. Зазор δ по малой полуоси сборки между зубьями ГК и зубьями ЖК необходим для обеспечения перемещения двух «лишних» зубьев ЖК (число зубьев ЖК на 2 больше, чем число зубьев ГК):

$$\delta = R_{\text{ЖК}} - \rho_{\text{сб. min}}$$

или

$$\delta = R_{\text{ЖК}} - \left[\frac{\rho_{\text{К min}} + (D_{\text{ГПнар}} - D_{\text{ГПвн}})}{2} + \frac{(D_{\text{ГКнар}} - D_{\text{ГКвн}})}{2} \right].$$

Рекомендуемое численное значение $\delta = 0,3-0,4$ мм. Уменьшение зазора может привести к зубцовой интерференции, увеличение – к сокращению зоны силового контакта зубьев.

3. Соотношения периметров (или эквивалентных диаметров) «К-ГП» и «ГП-ГК» должны быть такими, чтобы была возможна их сборка. При этом не должно быть сильного натяга или проскальзывания между сопрягаемыми парами. В общем случае периметры должны быть примерно равными или периметр поверхности внешней детали меньше периметра поверхности внутренней детали на 10–20 мкм:

$$P_{\text{К}} \approx P_{\text{ГПвн}}; \quad P_{\text{ГПнар}} \approx P_{\text{ГКвн}}$$

или

$$0 \leq P_{\text{ГПвн}} - P_{\text{К}} \geq 20; \quad 0 \leq P_{\text{ГКвн}} - P_{\text{ГПнар}} \geq 20.$$

4. Соотношение высот зубьев ГК и ЖК для правильного зацепления должно быть примерно равным, т. е. $H_{\text{ГК}} \approx H_{\text{ЖК}}$.

Если $H_{\text{ГК}} > H_{\text{ЖК}}$, то при работе вершины зубьев ГК будут снашиваться, а сами зубья – больше (чем при равенстве высот) изгибаться по впадинам при нагружении. И то, и другое уменьшает ресурс и нагрузочную способность.

Если $H_{\text{ГК}} < H_{\text{ЖК}}$, то при работе вершины зубьев ЖК будут упираться во впадины зубьев ГК и создавать разрывающие усилия в оболочке ГК. Кроме того, впадины зубьев ГК будут изнашиваться, что приведет к ослаблению оболочки ГК со всеми вытекающими последствиями.

5. Пятый критерий характеризует «гладкость» рабочей поверхности кулачка.

Вычисление периметра кулачка (по п. 3) производилось путем аппроксимации рабочей поверхности кулачка эллипсами по каждому двум соседним точкам. Таким образом, поверхность кулачка представляется в виде суммы 72 эллипсов. Геометрическое место центров этих эллипсов образует некоторую фигуру,

которая неявно характеризует конфигурацию профиля кулачка (рис. 2).

Фигура геометрических центров соответствует «правильному» кулачку (рис. 2, а), затем – кулачкам с геометрией внешней поверхности, отличной от эллипса. Искажение геометрии может привести к несимметрии силового нагружения ВЗП (рис. 2, б), к повышению вероятности появления интерференции в отдельных точках периметра (рис. 2, в), либо к появлению других негативных явлений, возникающих при работе ВЗП.

Рассмотрим процесс селективной сборки ВЗП, который выполняется по схеме, представленной на рис. 3.

1. Измерение (паспортизация) геометрических параметров деталей.

Те геометрические параметры элементов ВЗП, которые используются при расчете критериев, измеряются по специально разработанной методике, которая называется «Методика паспортизации элементов ВЗП». В ней подробным образом расписано, какие параметры деталей должны измеряться, каким инструментом, с какой погрешностью указаны формы представления результатов и т. д.

В частности, радиус-векторы кулачков, подшипников, ГК и ЖК измерялись на координатной измерительной машине (КИМ). Высота зубьев – специальным щупом. Кроме того, высота зубьев измерялась дополнительно с помощью микроскопа на эпоксидных слепках (рис. 4), снятых с различных частей периметра ГК и ЖК. Измерения высоты зубьев производились по специально разработанной методике.

Данные из протоколов измерений вводятся в информационную базу программного обеспечения по расчету, анализу и моделированию геометрии зацепления ВЗП.

2. Обработка результатов измерений заключается в вычислении параметров деталей в том виде, в котором они заданы в конструкторской документации. Например, диаметры ГП, ГК и ЖК определяются как средние значения радиус-векторов. Все измеренные данные заносятся в сопроводительный паспорт детали.

3. Допусковый контроль заключается в определении величин отклонения размеров деталей от допусков, заданных конструкторской документацией. По его результатам производится предварительная отбраковка деталей, размеры которых выходят за допуск. Часть из них после доработки и измерений используется для дальнейшего рассмотрения.

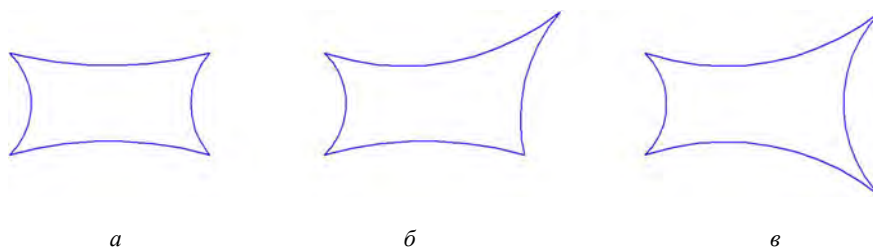


Рис. 2. Фигуры геометрических центров аппроксимирующих эллипсов кулачков

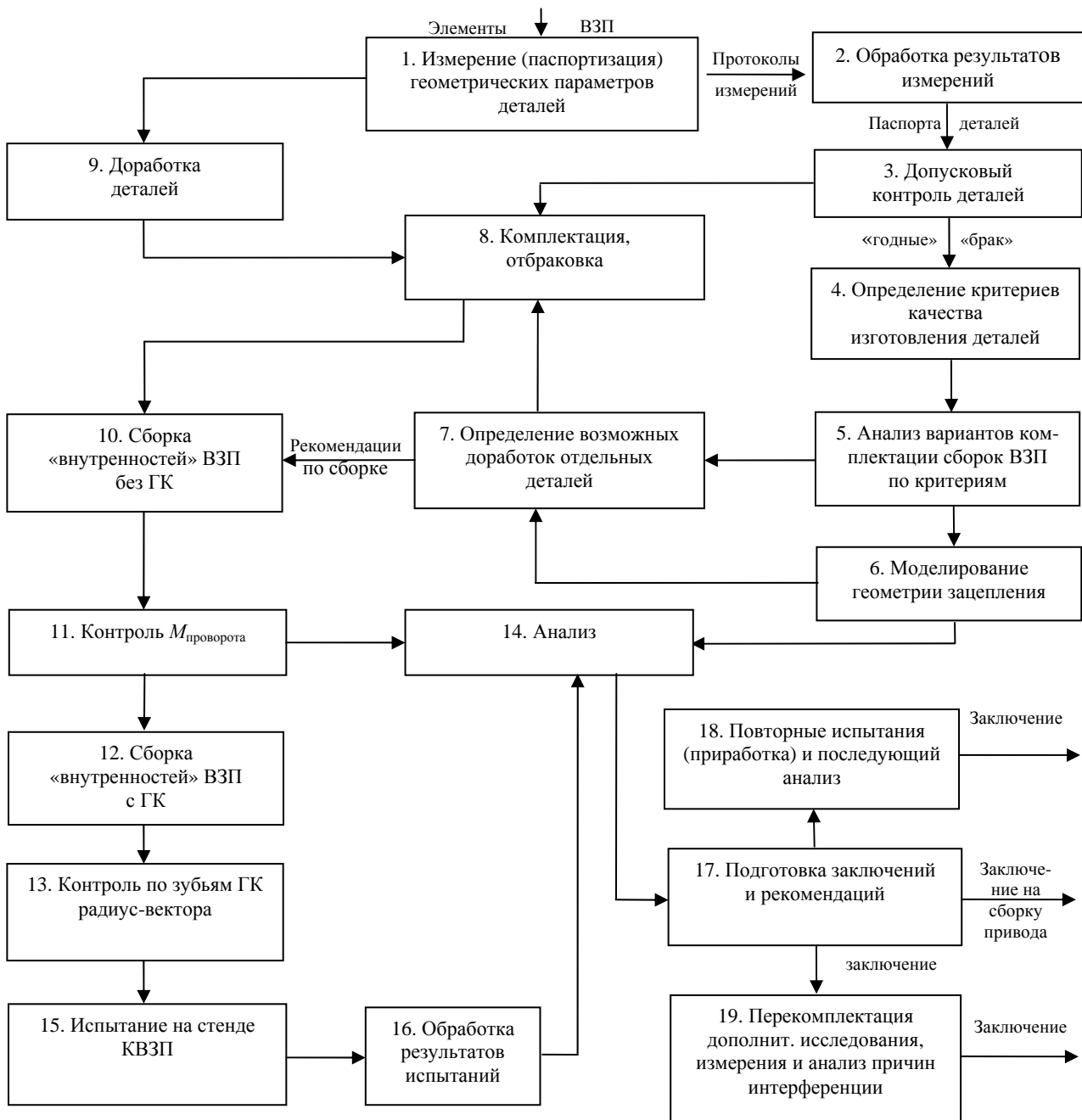


Рис. 3. Операции контроля, сборки и испытаний ВЗП

4. Для годных деталей и деталей, имеющих незначительные отклонения от допуска, определяются критерии сборки и перебираются все варианты комплектации ВЗП по этим критериям. Вычисления производятся с помощью специально разработанных программ.

Для иллюстрации в таблице приведены результаты измерений и вычислений параметров выходной волновой зубчатой передачи для тангажного привода солнечных батарей КА «Ресурс-ДК». Представлены данные элементов ВЗП только для трех комплектов, хотя измерениям и обработке было подвергнуто большое число деталей. Цифры в скобках соответствуют измерениям после доработки деталей.

5. Анализ вариантов комплектации сборок ВЗП по критериям выполняется специалистами, имеющими

опыт в данной области. Из-за отсутствия формализованных зависимостей между критериями, этот процесс пока не компьютеризирован.

В результате анализа выбираются варианты комплектации для сборки ВЗП. Обычно передаются для трех приводов солнечных батарей: два штатных – для установки на КА и один – для специспытаний и наземной отработки.

Оцениваются также такие варианты, которые на первый взгляд являются совершенно неприемлемыми, но после определенной доработки отдельных деталей могут быть вполне пригодны. Так, в ВЗП приводов КА «Ресурс-ДК» дорабатывались ГК из-за явного неравенства высот их зубьев.

Параметры, критерии элементов ВЗП тангажного привода солнечных батарей КА «Ресурс-ДК»

Кулачок						
№ компл.	№ детали	ρ_{\min}	ρ_{\max}	P_K	«Гладкость»	
1	11	32,047	32,883	204,296	4	
2	10	32,047	32,885	204,308	5	
3 _{исп}	9	32,045	32,885	204,302	5+	
Подшипник						
№ компл.	№ детали	$R_{ГПвн}$	$R_{ГПнар}$	$P_{ГПвн}$	$P_{ГПнар}$	$W_{ГП}$
1	22	32,499	42,988	204,198	270,102	10,489
2	26	32,498	42,988	204,191	270,102	10,490
3 _{исп}	28	32,499	42,988	204,198	270,102	10,490
Гибкое колесо						
№ компл.	№ детали	$R_{ГКвн}$	$R_{ГКнар}$		$P_{ГКвн}$	$H_{ГК}$
1	5–4	43,015	44,636 (44,592)		270,272	0,630 (0,586)
2	1–6	43,019	44,665 (44,564)		270,297	0,710 (0,609)
3 _{исп}	5–8	43,011	44,665 (44,563)		270,247	0,700 (0,580)
Жесткое колесо						
№ компл.	№ детали	$R_{ЖКвн}$				$H_{ЖК}$
1	1–8	44,543				0,546
2	1–1	44,545				0,520
3 _{исп}	1–15	44,541				0,500
Значения критериев для скомплектованных ВЗП						
№ компл.	K_3	δ	Посадка сопрягаемых деталей		$H_{ГК} - H_{ЖК}$	Результаты испытаний на интерференционный шаг
			$P_{ГПвн} - P_K$	$P_{ГКвн} - P_{ГПнар}$		
1	0,824 (0,750)	0,086 (0,126)	-0,099	0,170	0,084 (0,040)	Интерференции нет
2	0,915 (0,705)	0,062 (0,162)	-0,117	0,195	0,190 (0,089)	Интерференции нет
3 _{исп}	0,974 (0,746)	0,053 (0,153)	-0,104	0,145	0,200 (0,080)	Незначительная интерференция при больших нагрузках

6. Моделирование с помощью ПК на геометрической модели зацепления позволяет «увидеть» количество зубьев, находящихся в зацеплении, площадь зацепления каждой пары зубьев, траекторию движения кромки зуба при повороте кулачка. Модель позволяет также «увидеть» и вычислить многие другие параметры зацепления, которые пока еще не осмыслены и не привязаны к характеристикам ВЗП.

7. На основании проведенных измерений, расчетов, анализа готовятся рекомендации по возможной доработке отдельных деталей и комплектации ВЗП (пп. 8 и 9).

8. Собираются ВЗП поэтапно с целью контроля промежуточных сборок. В первую сборку входит все содержимое «внутренностей» кулачка (т. е. деталей привода, к ВЗП не относящихся), плюс гибкий подшипник.

9. Сборка подвергается контролю по крутящему моменту проворота гибкого подшипника. Эта операция позволяет определить правильность подбора ГП

для данного кулачка. В случае большого момента ГП заменяется на подшипник с большим зазором.

10. Далее собирается часть привода совместно с ГК.

11. Контроль радиус-вектора сборки с ГК по вершинам зубьев позволяет определить форму огибающей реально деформированного ГК и сравнить её с моделью (п. 14).

12. Далее сборка подвергается испытаниям на стенде контроля волновых зубчатых передач КВЗП-01 в соответствии с разработанной «Методикой оценки ВЗП на нагрузочную способность по условию отсутствия интерференции на стенде КВЗП-01». Смысл испытаний состоит в нагружении выходного вала ВЗП крутящим моментом в рабочем диапазоне нагрузок и вращении волнообразователя (кулачка) в заданном диапазоне угловых скоростей, т. е. в имитации условий эксплуатации. При этом жесткое колесо является измерительным и образцовым, а не штатным из комплекта испытываемой ВЗП. Измерительное жесткое колесо (ИЖК) (рис. 4) имеет два (располо-

женных диаметрально противоположно) измерительных зуба с наклеенными на них тензорезисторами. Характер деформаций этих измерительных зубьев свидетельствует о наличии или отсутствии зубцовой интерференции.



Рис. 4. Измерительное жесткое колесо ВЗП стенда КВЗП-01 (показан момент получения слепка с зубьев)

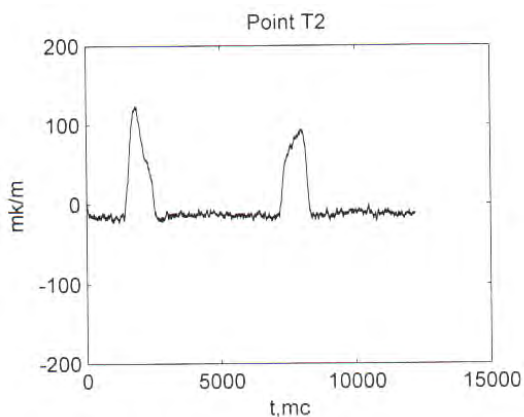
Типичные эпюры деформаций измерительных зубьев при испытаниях сборок ВЗП на стенде КВЗП-01 представлены на рис. 5.

График деформации измерительного зуба ИЖК «правильной» ВЗП представлен на рис. 5, а. Первый

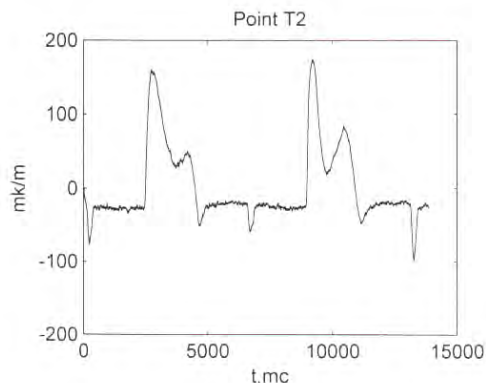
импульс соответствует прохождению волны деформации ГК от первой половины кулачка, второй – от второй половины кулачка. Небольшое отличие их формы показывает, что геометрия обеих половин кулачка почти одинакова, ось вращения кулачка совпадает с осью ИЖК и силовое взаимодействие в зоне контакта равномерно и одинаково. Ширина графика соответствует одному обороту кулачка внутри гибкого колеса. Импульсы отстоят друг от друга на 180° , а их ширина эквивалентна зоне контакта. Зная угловой размер зуба можно определить, сколько зубьев одновременно находится в зацеплении.

Форма графика на рис. 5, б свидетельствует о наличии интерференции на выходе измерительного зуба из зацепления (небольшие отрицательные выбросы после основных импульсов), а также в области малой полуоси кулачка (между основными импульсами).

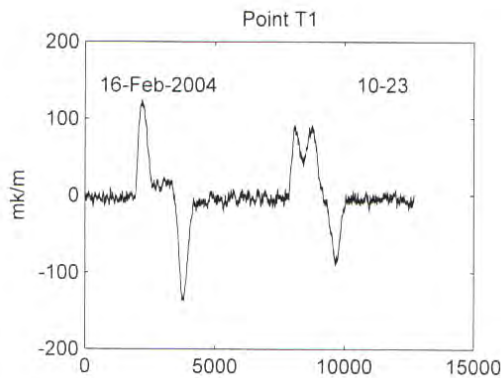
В области малой полуоси кулачка, где происходит взаимное перемещение зубьев ГК и ЖК, интерференция вообще недопустима, так как велика вероятность поломки ВЗП. Большая ширина импульсов говорит, что слишком велика зона зацепления зубьев ГК и ЖК (почти 60°), скорее всего из-за неправильной формы кулачка.



а



б



в

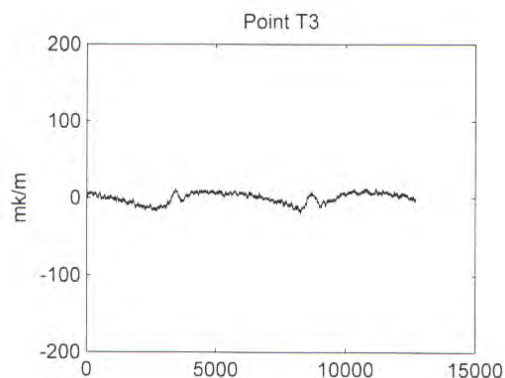


Рис. 5. Эпюры деформаций измерительных зубьев измерительного жесткого колеса при испытании сборок ВЗП на стенде

На рис. 5, в представлены графики, снятые одновременно с двух взаимно противоположных измерительных зубьев. Видно, что имеется сильная интерференция на одном зубе (отрицательные выбросы) и почти полное отсутствие силового взаимодействия на втором зубе. Причина, видимо, в том, что либо центр кулачка сильно смещен относительно оси ИЖК, либо форма огибающей одной из половинок кулачка искажена.

Таким образом, испытания на стенде позволяют проконтролировать работу ВЗП в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, и оценить их фактические характеристики. В процессе испытаний также осуществляется приработка зубьев ГК и ЖК друг к другу. Их форма становится ближе к эвольвентной (при изготовлении она трапецеидальная) и если имеется незначительная интерференция, то она, практически, исчезает.

13. Обработка результатов испытаний и последующий анализ заключаются в определении дополнительных данных (например, числа зубьев, находящихся в зацеплении и т. д.) по экспериментально полученным эпюрам и характеристикам, привязке и сопоставлению всех имеющихся данных, поиску возможных причин интерференции или других отклонений характеристик данной ВЗП.

14. По результатам анализа выдается заключение о дальнейшей судьбе ВЗП: а) если она признается годной, то передается на дальнейшую сборку привода;

б) снова подвергается испытаниям на стенде для приработки и последующего контроля; в) направляется на перекомлектацию и дополнительные исследования с целью установления причин отклонения характеристик ВЗП.

Описанная методика пооперационного контроля изготовления и сборки ВЗП приводов СБ была реализована для КА «Ресурс-ДК», успешная эксплуатация которого более назначенного срока, в частности, отсутствие претензий к работе приводов, подтвердила эффективность описанного технологического процесса селективной сборки.

Резюмируя изложенное применительно конкретно к волновым передачам, можно сформулировать следующие выводы:

1) элементы ВЗП должны подвергаться тщательному контролю их параметров на всех стадиях изготовления, сборки и испытаний;

2) должно быть разработано достаточное количество критериев, позволяющих оценить совместимость параметров составных элементов и определить ожидаемые характеристики передачи (в данном случае, всего пять простых критериев позволили собрать ВЗП с вполне приемлемыми характеристиками);

3) испытания ВЗП показали, что форма зубьев гибкого и жесткого колес существенно влияет на работу передачи, поэтому она должна контролироваться и должны быть разработаны соответствующие критерии.

O. P. Prudnikov, S. V. Tyulevin, D. V. Nazarov

METHOD AND CRITERION OF SELECTIVE ASSEMBLY OF WAVE GEAR DRIVES OF SOLAR BATTERIES OF SPACE VEHICLES

The authors offer a method of selective assembly of wave gear drives of the solar batteries, using five criterion for estimation of geometry and mutual interface of elements of the drive. These criterion, their calculation and results of practical application, are described.

Keywords: solar batteries drives, wave drives, selective assembling, criterion, technological process.

© Прудников О. П., Тюлевин С. В., Назаров Д. В., 2012

УДК 621.396.677

В. Н. Тяпкин, А. С. Першин, Д. Д. Дмитриев, Т. Г. Мошкина

АДАПТИВНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ

Приведен один из вариантов исполнения адаптивной антенны, позволяющий эффективно подавлять помеху с заданного направления, при сохранении уровня сигнала в большей части зоны обслуживания.

Ключевые слова: космический аппарат, адаптивные многолучевые антенны, кластер.

Развитие современных антенных систем, в том числе военной связи, потребовало обеспечение высокой помехозащищенности антенной системы от направленных помех. При использовании классических многолучевых антенн (МЛА), где схема антенно-фидерной системы (АФС) построена по принципу «облучатель – луч», защита от помехи осуществляет-

ся отключением приемника для заданного луча. Однако это также лишало связи или приводило к значительному ухудшению качества связи тех, кто находился в зоне отключения сигнала [1; 2].

Решением данной проблемы стало развитие адаптивных антенных систем. Принципиальное отличие данных систем заключается в том, что они позволяют