НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

О повышении точности определения комплексных погрешностей сателлитных узлов планетарных передач

10, октябрь 2012
DOI: 10.7463/1012.0479419

Насонов Д. А., Леонтьев М. Ю., Шубин А. А.

УДК 621.83.05

Россия, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
nasonovda@yandex.ru
newell-kaluga@mail.ru
shubin55@mail.ru

Работоспособность, прочность и виброактивность зубчатых редукторов, выполненных по планетарной схеме, в значительной степени зависит от равномерности распределения нагрузки по параллельным потокам передаваемой мощности (между сателлитами) [1, 2]. В свою очередь, соблюдение названного условия во многом определяется погрешностями изготовления и сборки сателлитных узлов [3].

В работе [1] предложено в процессе сборки редуктора минимизировать указанные погрешности посредством регулировки межцентровых расстояний сателлитов с помощью эксцентриковых втулок, устанавливаемых в расточки водила под опорные шейки их осей. Однако для реализации данного предложения необходимо максимально точное определение фактических значений погрешностей сателлитных узлов, что, как показывает опыт одного из ведущих отечественных производителей планетарных редукторов большой мощности [3], является весьма нетривиальной задачей.

Рассматриваемые погрешности рассчитываются по данным технологических карт контроля точности, заполняемых специалистами ОТК завода-изготовителя на основе результатов прямых и косвенных измерений первичных ошибок изготовления элементов планетарной ступени в рамках «комплексного точностного параметра» (далее «КТП») планетарного механизма.

Изначально «КТП» был разработан для планетарных редукторов с прямозубыми цилиндрическими зубчатыми колесами [1]. Впоследствии он был распространен на шевронное зацепление и неоднократно уточнялся [4] Последняя уточненная версия «КТП» была приведена в работе [5], где на основе экспериментальных данных была выявлена корреляция указанного параметра с зубцовой вибрацией планетарного редуктора.

Согласно [5], комплексные погрешности изготовления и сборки сателлитных узлов шевронного планетарного редуктора могут быть определены, как

$$\Delta_i = \cos\alpha_T \left(\frac{2}{\cos \pi/z_c} \sum_{k=1}^{i-1} \Delta X_{k,k+1} + \Delta e_i^{o-b} + \Delta e_i^{o-c} + 2\Delta e_i^{o(c-b)} - \Delta b_i \frac{\cos\beta_d}{\cos\alpha_T} \right). \quad (1)$$

Здесь Δ_i - погрешности суммарных зазоров в зацеплениях полушевронов сателлитов с центральными колесами для случая, когда нумерация сателлитов от i до z_c совпадает с направлением окружных сил на их осях (с направлением крутящего момента на солнечной шестерне), причем погрешности вычисляются отдельно для каждого полушеврона;

α_T - угол зацепления в торцовом сечении (делительный угол профиля в торцовом сечении), определяемый из соотношения

$$\alpha_T = arctg \frac{tg\alpha_n}{\cos\beta_d},$$

где α_n - угол профиля исходного контура рейки в нормальном сечении,

β_d - угол наклона зуба на делительном цилиндре;

$\sum_{k=1}^{i-1} \Delta X_{k,k+1}^{'(")}$ - накопленные ошибки хордальных расстояний между первой и i-й осями расточек в щеках водила;

Δe_i^{o-c}, Δe_i^{o-b} - погрешности диаметральных зазоров в соединениях осей с сателлитами и водилом, отнесенные к полушевронам сателлитов:

$\Delta e_i^{o-b} = \Delta d_i^b - \Delta d_i^{0-b}$; $\Delta e_i^{o-c} = \Delta d_i^c - \Delta d_i^{o-c}$,

где Δd_i^b - погрешности диаметров расточек под оси в щеках водила,

Δd_i^c - погрешности средних по длине полушевронов диаметров расточек в сателлитах под оси,

Δd_i^{o-b} - погрешности диаметров посадочных шеек осей под установку в щеки водила,

Δd_i^{o-c} - погрешности средних по длине полушевронов диаметров посадочных поверхностей осей под сателлиты;

$\Delta\delta_i^{o(c-b)}$ - погрешности отнесенных к полушевронам тангенциальных составляющих эксцентриситетов посадочной поверхности i-й оси под сателлит относительно ее посадочных поверхностей под установку в водило;

Δb_i - постоянные составляющие погрешности толщины зубьев i-го сателлита по полушевронам.

При использовании выражения (1) для расчета «КТП» наибольшие трудности возникают с определением хордальных расстояний между расточками под сателлиты в водиле ($\Delta X_{k,k+1}$), что связано с отсутствием у большинства отечественных производителей редукторов большой мощности современного высокоточного оборудования, позволяющего получать координаты расточек столь крупногабаритных и имеющих сложную геометрию узлов, как водило (рис. 1), путем прямых измерений.

На практике ошибки взаимного расположения расточек в водиле определяются по результатам измерения межцентровых расстояний и скрещивания, специальных контрольных валов, устанавливаемых с заданной точностью в указанные расточки. В общем случае измерениям на каждой из щек водила подлежат расстояния между осями расточек под сателлиты и центральной осью водила (далее - радиальные межцентровые расстояния) и между осями соседних расточек под сателлиты (далее - хордальные межцентровые расстояния). Скрещивания осей определяются для расточек водила под сателлиты относительно центральной оси и между осями соседних расточек под сателлиты.

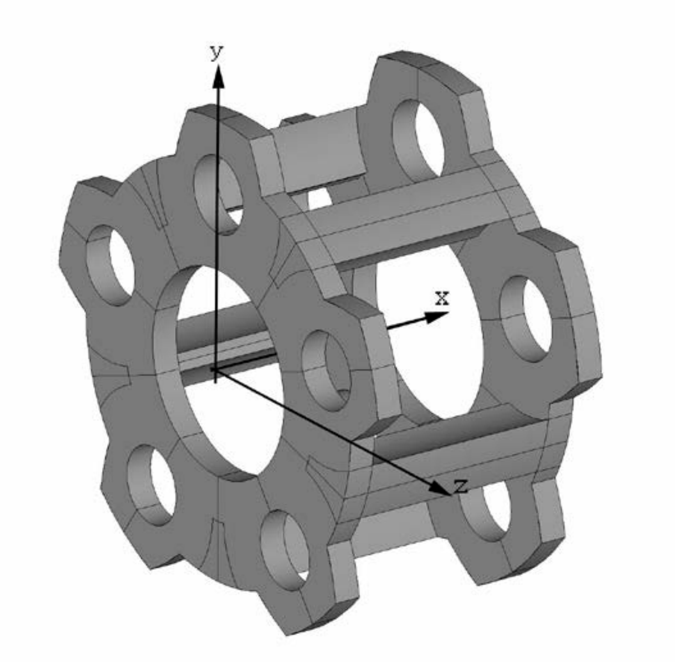

Рис. 1 Модель водила планетарного редуктора с пятью сателлитами

В работе [1] из всех названных параметров для определения искомых погрешностей изготовления водила рекомендуется использовать только хордальные межцентровые расстояния, пренебрегая всеми остальными измерениями. Представляется, что такое искусственное сужение используемых в расчетах исходных данных едва ли оправдано, поскольку может давать значительное отклонение получаемых результатов от фактических значений искомых ошибок.

Для повышения точности их определения в работе [6] были предложены математическая модель и алгоритм численного решения, позволившие получать искомые координаты расточек под сателлиты в водиле с учетом ***всех*** контролируемых параметров. При этом были преодолены вычислительные трудности, связанные с необходимостью решения переопределенной (из-за значительно возросшего числа исходных данных) и несовместной (из-за неизбежных погрешностей измерения) системы уравнений.

Рассмотрим указанную модель и соответствующий ей алгоритм численного решения на примере определения координат расточек под оси для водила планетарной ступени с пятью сателлитами (рис. 1).

Для составления модели введем декартову систему координат с центром в плоскости носовой щеки водила таким образом, чтобы центральные расточки водила определяли координатную ось X, а центр расточки под ось первого сателлита определял направление координатной оси Y (рис. 1). Обозначения остальных параметров иллюстрируют рис. 2-4.

На рис. 2 точками P_0 и P'_0 обозначены центры левой и правой расточек водила под опорные шейки, точками P_1 и P'_1 – центры расточек под ось первого сателлита. Из-за погрешностей изготовления точка P'_1 может отклоняться от плоскости, определяемой точками P_1, P_0 и P'_0, а величина этого отклонения S_1 характеризует скрещивание оси первого сателлита относительно центральной оси водила, принимаемой за базу (ось X, рис. 1).

В результате измерений радиальных межцентровых расстояний водила определяются величины $R_1 \div R_5$, $R'_1 \div R'_5$, $S_1 \div S_5$ (рис 3). За положительное значение S_i на рис.3 принято смещение точки P'_i относительно P_i вокруг оси X (ось P_0-P'_0) против часовой стрелки, если смотреть с конца оси X, штрихами обозначены центры расточек на правой щеке, без штрихов – на левой.

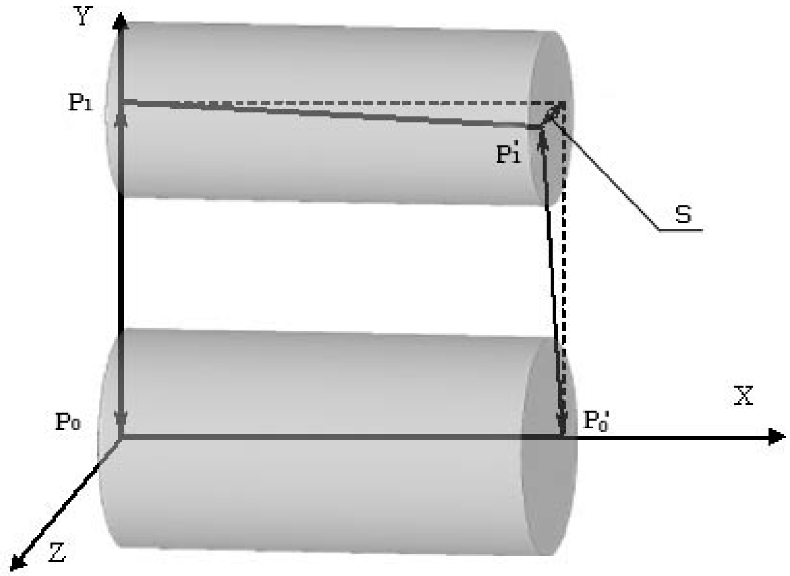

Рис. 2. Схема измерения взаимного расположения расточек под ось первого сателлита относительно центральной оси водила

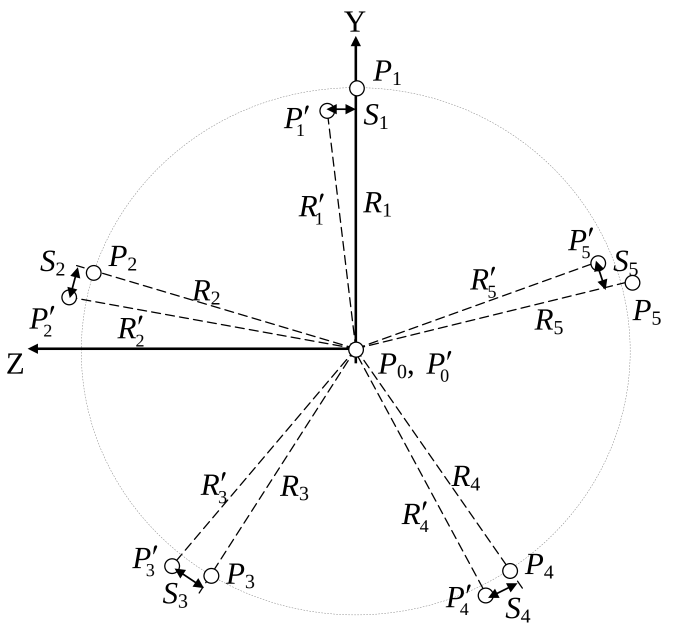

Рис 3. Вид на центры расточек (Pi, P′i) водила с конца оси X

Измерением хордальных межцентровых расстояний водила и скрещивания осей соседних расточек под сателлиты определяются величины $h_i=|P_i\ P_{i-1}|$ (рис. 4), $h'_i=|P'_i\ P'_{i-1}|$ и δ_i (геометрическая интерпретация параметра δ_i (рис. 5) рассмотрена ниже), где $i=1\div5$. При этом, в силу цикличности индексации, имеем $h_1=|P_1\ P_5|$, $h'_1=|P'_1\ P'_5|$. Нумерация центров расточек P_i осуществляется против часовой стрелки, если смотреть с конца оси X.

Если в качестве допущения считать, что обе щеки водила параллельны, т.е. центры всех расточек лежат либо в плоскости YZ (левая щека), либо в плоскости, параллельной YZ (правая щека), то можно не сводя задачу к двухмерной, исключить из расчетов координату X.

Учитывая, что точки P_0, P'_0 приняты за базовые, а направление оси Y определяется центром первой расточки (координата z точки P_1 равна нулю), в качестве неизвестных имеем y-z координаты центров расточек под оси сателлитов на левой и правой щеках, т.е. 19 величин.

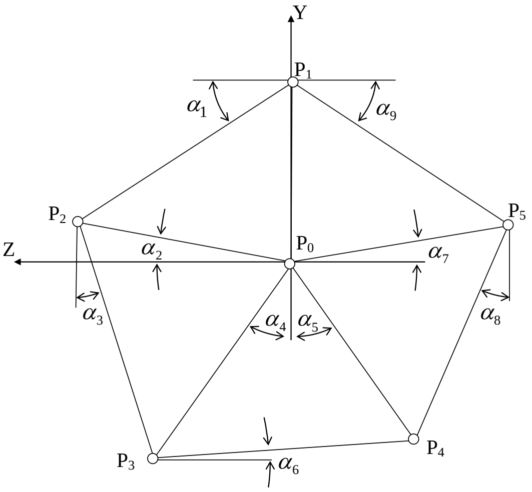

Рис. 4. Схема расположения центров расточек в плоскости щеки водила YZ (P) и угловых величин для тригонометрических соотношений (α)

Обозначив угловые величины в соответствии с рис. 4, можно записать группу из 19 тригонометрических соотношений связывающих результаты измерений и координаты центров расточек на левой щеке водила (9 неизвестных):

$$\begin{cases} y_1 = R_1, \\ z_2 = R_2\cos(\alpha_2), \\ y_2 = R_2\sin(\alpha_2), \\ z_2 = h_2\cos(\alpha_1), \\ -y_1 + y_2 = -h_2\sin(\alpha_1), \\ \dots\ . \end{cases} \tag{2}$$

Аналогичные 20 уравнений, которые можно записать относительно y-z координат центров расточек на правой щеке (10 неизвестных), дополняют систему (2). Угловые величины в системе (2) взяты в предположении, что точки $P_1 - P_5$ (рис. 4) и $P'_1 - P'_5$ образуют правильные пятиугольники. На самом же деле, при наличии погрешностей изготовления водила, правильность этих пятиугольников нарушается. Следовательно, зависимость расчетных координат от измеряемых параметров носит нелинейный характер, а система (2) представляет собой линеаризованную математическую модель, позволяющую, как показано ниже, получать приемлемые для практического использования приближенные решения.

Для учета всех имеющихся результатов измерений, запишем еще две группы уравнений. Первую группу получим из рассмотрения скрещивания осей расточек под сателлиты относительно центральной оси водила. Так, например, для расточки под ось сателлита №2 (i=2), параметр s_2 (рис. 3) будет связывать координаты только центров расточек P_2 и P'_2, поскольку центральная ось является базой:

$$\begin{cases} -z_2 + z'_2 = s_2 \sin(\alpha_2), \\ -y_2 + y'_2 = -s_2 \cos(\alpha_2), \\ \dots \quad . \end{cases} \qquad (3)$$

С учетом параметров скрещивания s_1 – s_5 система (3) содержит 9 уравнений относительно все тех же 19 неизвестных, названных выше.

Вторая группа уравнений получается при анализе скрещивания δ осей расточек под соседние сателлиты. В этом случае, в отличие от предыдущего, ни одна из осей не является базовой, и параметр δ связывает не две, а четыре точки. На рис. 5, поясняющем геометрический смысл параметра δ_i, показан вид на i-ю и (i-1)-ю расточки со стороны конца оси X.

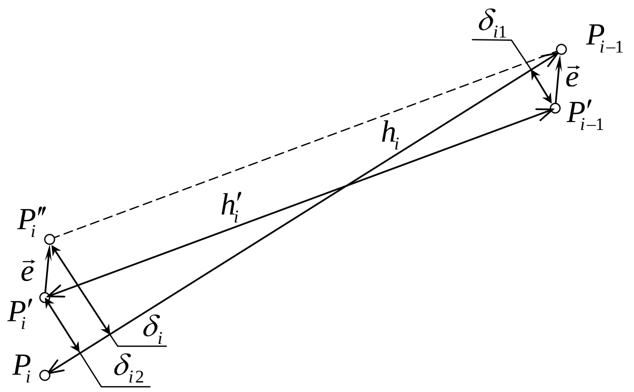

Рис 5. Вид на центры расточек под оси соседних сателлитов со стороны конца оси X (рис. соответствует *i* = 2)

Величина δ_i характеризует скрещивание i-й и (i-1)-й осей расточек и состоит из двух компонент: $\delta_i=\delta_{i2}-\delta_{i1}$, где δ_{i1} и δ_{i2} – расстояния от точек P'_{i-1} и P'_i до линии P_{i-1}-P_i, в проекции на плоскость YZ. Причем за положительное значение принимается величина δ, если P'_i (P'_{i-1}) и P'_0 (центр водила) располагаются по разные стороны от линии P_{i-1}-P_i. Ту же величину имеем при измерении расстояния от точки P''_i до линии P_{i-1}-P_i (точка P″i получается путем параллельного переноса P'_i на вектор e, совмещающий точки P'_{i-1} и P_{i-1}). Именно эта величина и подлежит непосредственному контролю в процессе измерений, когда, согласно принятой технологии измерений, за базу принимается (i-1)-я ось.

Параметр δ_2, например, позволяет записать следующие, входящие в систему четыре, уравнения:

$$\begin{cases} -z_2' + z_2 + z_1 - z_1' = \delta_2 \sin(\alpha_1), \\ -y_2' + y_2 + y_1 - y_1' = \delta_2 \cos(\alpha_1), \\ \dots\ . \end{cases} \tag{4}$$

Система (4), учитывающая параметры $\delta_i \div \delta_5$, содержит десять уравнений.

После объединения систем (2), (3) и (4), получается система из пятидесяти восьми уравнений относительно девятнадцати неизвестных, представляющая собой математическую модель, пригодную для вычисления погрешностей изготовления водила по результатам их косвенных измерений, и учитывающую, в соответствии с поставленной задачей, все имеющиеся результаты.

Как уже отмечалось, данная система является не только переопределенной и несовместной (из-за погрешностей измерений), но и преднамеренно линеаризованной с целью максимального упрощения. Для ее решения был разработан итерационный алгоритм [6], позволяющий преодолеть последствия использованных упрощений.

Согласно данному алгоритму первое приближенное решение полученной системы уравнений ищется с использованием геометрических параметров α_i (рис. 4), определяемых в предположении, что искомые координаты расточек водила под сателлиты образуют правильные пятиугольники. Далее угловые величины α_i уточняются с использованием результатов первой итерации, и расчет повторяется. Последующие приближения рассчитываются аналогичным образом до достижения требуемой точности.

Критерием точности получаемых результатов на каждой итерации служит сумма квадратов невязок (разностей между левыми и правыми частями уравнений уточненной обобщенной системы, при подстановке в неё вычисленных на последней итерации неизвестных), свидетельствующая о степени отклонения расчетных величин от измеряемых. Стабильное уменьшение этой величины, отмеченное при решении тестовых примеров, свидетельствует о хорошей сходимости итерационного процесса [6].

В связи с повышенными требованиями к точности расчетов описанный алгоритм реализован в пакете символьных вычислений Стивена Вольфрама «Mathematica», позволяющем производить расчеты с любой наперед заданной точностью, независимо от разрядности используемой машины [7].

Анализ результатов выполненных тестовых расчетов показал, что одной из особенностей описанной математической модели является то, что при равноценности всех используемых в качестве исходных данных результатов измерений, их влияние на искомые координаты расточек под сателлиты в водиле существенно различается. Это происходит из-за того, что тригонометрические функции, находящиеся в правой части уравнений (2)-(4), играют роль весовых коэффициентов, и получаемое решение неизбежно «смещается» в сторону тех параметров, при которых стоят большие весовые коэффициенты.

При попытке перенести эти коэффициенты в левую часть, обусловленность системы, к решению которой приводит метод наименьших квадратов, резко ухудшается и сходимость решения недопустимо падает. Дело в том, что синусы некоторых углов в окрестностях решения столь малы, что перенос их в левую часть подобен делению на ноль. С другой стороны, вклад исходных данных (результатов измерений), при которых стоят близкие к нулю коэффициенты, в конечный результат вычислений столь ничтожен, что эти уравнения можно исключить из системы практически без потери точности.

На основании изложенного разработанная ранее модель была упрощена путем исключения из нее четырех уравнений, содержащих множитель sin(α_6), и переноса тригонометрических функций в левую часть, что исправляет допущенную ранее некорректность. Далее по тексту в ссылках на используемую математическую модель будет иметься в виду исправленная система уравнений.

Дальнейший анализ модели выявил еще одно важное свойство, благодаря которому можно существенно повысить достоверность расчетов. Оказалось, что в силу переопределенности системы и характера взаимосвязи результатов косвенных измерений, из нее можно исключить все уравнения, связанные с любым (но одним) из результатов измерений. При этом ранг матрицы коэффициентов системы не становится меньше числа неизвестных, что дает возможность ее приближенного решения.

Подставляя полученное решение «усеченной» таким образом системы уравнений в исключенные из нее уравнения, и решая их относительно исключенного параметра, можно получить его ожидаемое значение. Степень отклонения ожидаемого значения от измеренного, вполне может играть роль критерия достоверности данного параметра.

Если принять допущение, что в исходных данных (а это 30 результатов измерений) присутствует не более одной грубой ошибки, то процесс диагностирования и исключения такой ошибки легко автоматизируется и решается без человеческого участия.

Задача сводится к поочередному исключению из исходных данных каждого из результатов измерений и вычисления его ожидаемого значения. Если величина отклонения, какого-либо из результатов измерений от его ожидаемого значения больше некоторой заданной величины, то такой замер считается ошибочным, а в качестве наилучшего приближенного решения выбирается решение, полученное без учета этого результата измерения. Если величина максимального отклонения по всем измерениям не превышает заданной величины, то наилучшим считается решение, полученное с помощью полной системы (без исключения уравнений).

На рис.6 показаны среднеквадратичные отклонения исключаемых результатов измерений от их ожидаемых значений, вычисляемые по формуле

$$\delta_k = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(b_i - \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j\right)^2}\ , \quad k = 1, \ldots 30\,,$$

где k – номер исключаемого измерения;
a, b, x – коэффициенты системы [A]{X}={B}, составленной из уравнений, исключенных из модели;
m, n – размерность матрицы [A]. Правые части этих уравнений содержат значение исключенного измерения, а вектор {X} – решение «усеченной» системы уравнений, т.е. вычисленные координаты центров расточек.

Из рис. 6 видно, что δ_1 – отклонение первого параметра от ожидаемого значения, вычисленного по приведенной выше методике, максимально, что вполне соответствует тестовому набору исходных данных, где все замеры, кроме первого, соответствуют идеально изготовленной конструкции, а параметр № 1 (это результат измерения R_1 согласно рис. 3) отклоняется на 0,1 мм от номинального размера (600 мм). Наличие незначительных отклонений остальных параметров объясняются влиянием первого параметра, присутствующего в уравнениях при определении этих отклонений.

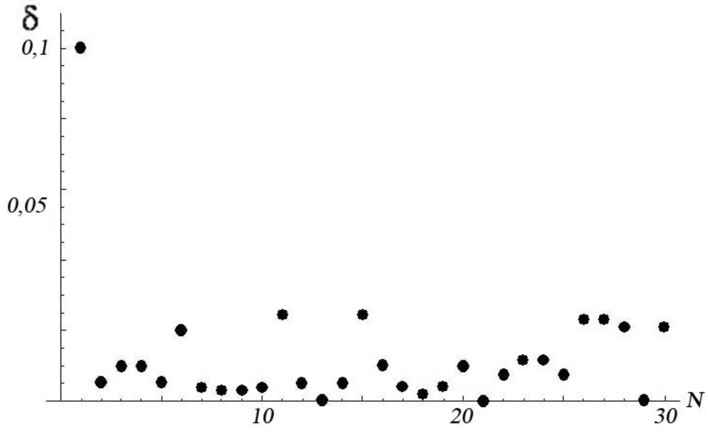

Рис. 6. Среднеквадратичные отклонения результатов измерений от их ожидаемых значений: ось абсцисс – порядковый номер исключаемого измерения, ось ординат – величина отклонения (мм)

При наличии более одной грубой ошибки в исходных данных, их диагностирование не так очевидно, особенно если величина ошибок одного порядка. Тем не менее, это возможно, но не в автоматизированном, а в ручном режиме путем анализа визуализированных результатов расчетов.

На рис. 7 приведен пример визуализации результатов тестовых расчетов с ошибочным результатом измерения R_1, причем на рис.7а отображены результаты решения при исключении из модели измерения R_1, а на рис.7б – без исключения R_1. Доверительные интервалы и отклонения центров расточек отображаются с соответствующим масштабным коэффициентом. Область 1 – доверительные интервалы положения центров расточек осей сателлитов (определяются расчетной точностью измерений). Центры областей 2 и 3 указывают положения центров расточек под оси сателлитов в правой и левой щеках водила.

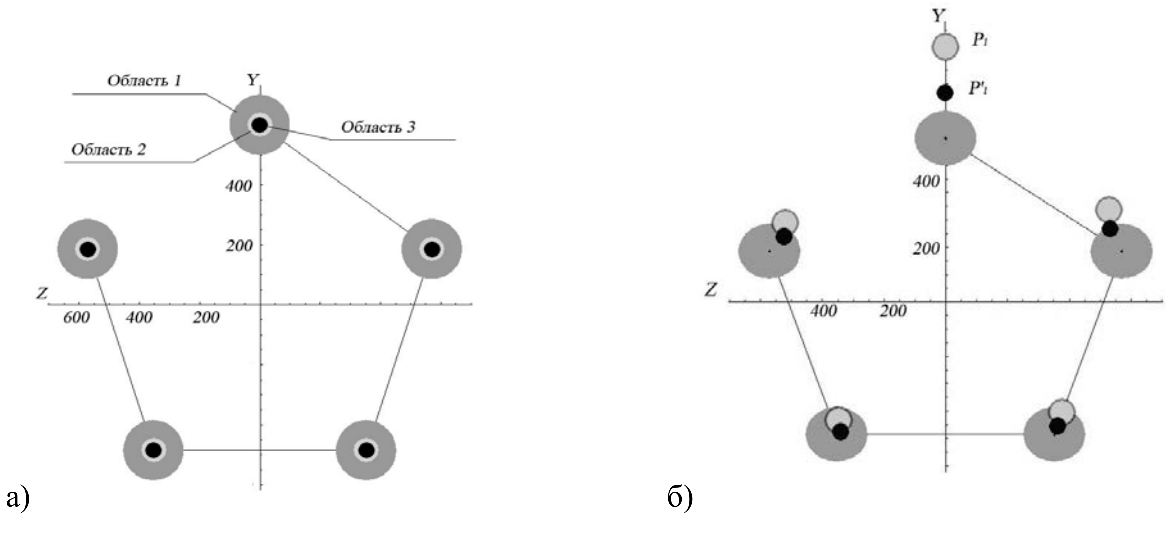

Рис. 7. Визуализация результатов тестовых расчетов с ошибочным измерением R1.

Использование найденных описанным выше способом (с учетом ***всех*** контролируемых заводом-изготовителем точностных характеристик водила) координат расточек под оси сателлитов в водиле для расчета параметров $\Delta X_{k,k+1}$ позволяет повысить достоверность определения искомых комплексных погрешностей изготовления и сборки сателлитных узлов в соответствии с (1), что имеет важное практическое значение.

Вместе с тем, имеющиеся экспериментальные и расчетные данные [5, 8-10] показывают, что для дальнейшего повышения корректности определения результативной точности зубчатых зацеплений и ее влияния на нагруженность и виброактивность планетарного редуктора необходимо учитывать не только входящие в (1) первичные погрешности изготовления его деталей и узлов, но и нагрузочно-скоростные характеристики конкретных режимов эксплуатации.

Последние влияют на фактические погрешности зубчатых зацеплений в процессе работы редуктора вследствие упругих деформаций его элементов под нагрузкой, а также смещений зубчатых колес в пределах зазоров и на жесткостях опор под действием усилий в зацеплениях, весовых нагрузок и центробежных сил.

Работы в указанном направлении ведутся.

Список литературы

1. Айрапетов Э.Л., Генкин М.Д. Статика планетарных механизмов. М.: Наука, 1976. 264 с.
2. Айрапетов Э.Л., Генкин М.Д. Динамика планетарных механизмов. М.: Наука, 1980. 256 с.
3. Леонтьев Ю.А., Ямпольский И.Д., Хомяков В.П., Леонтьев М.Ю. Опыт создания на ОАО «КТЗ» судовых редукторов большой мощности // Юбилейный сборник трудов Научно-исследовательского Центра ОАО «Калужский Турбинный Завод». Калуга: Манускрипт, 2002. С. 134-144.
4. Леонтьев М.Ю. Исследование статической нагруженности мощных судовых планетарных редукторов: дисс. …канд. техн. наук. М.: ИМАШ РАН, 2001. 229 с.
5. Леонтьев М.Ю., Полунин И.В., Лысенков В.С. Анализ влияния точности изготовления редукторов ГТЗА на виброактивность // Материалы V научно-технической конференции «Взгляд в будущее». СПб.: ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин», 2007. С. 319-328.
6. Леонтьев М.Ю., Насонов Д.А. Об алгоритме численного решения одной из некорректно заданных задач, представляющей практический интерес // Материалы V Общероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы современной науки и образования». Вып. 2. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2010. С. 280-287.
7. Дьяконов В.П. Mathematica 4 с пакетами расширений. М.: «Нолидж», 2000. 608 с.
8. Айрапетов Э.Л., Апархов В.И., Бедный И.А., Леонтьев М.Ю. Расчетные исследования малонагруженных планетарных передач // Теория и практика зубчатых передач: труды международной конференции. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1996. С. 141-146.
9. Айрапетов Э.Л., Апархов В.И., Бедный И.А., Леонтьев М.Ю. Влияние весовой нагрузки зацеплений на динамику крупногабаритных планетарных передач // Proceedings of the 5-th International Conference «Dynamics of machine aggregates». Gabcikovo, Slovak Republic, 2000.
10. Леонтьев М.Ю., Насонов Д.А. К вопросу о влиянии погрешностей изготовления и деформаций сателлитного узла на динамику планетарного редуктора // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе». Т. 1. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 76-81.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

On increasing the accuracy of combined errors estimation in satellite planetary gear units

 # 10, October 2012

DOI: 10.7463/1012.0479419

Nasonov D.A., Leont'ev M.Yu., Shubin A.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch

nasonovda@yandex.ru

newell-kaluga@mail.ru

shubin55@mail.ru

The authors consider practical ways to control combined errors in satellite planetary gear units used by manufacturing plants. The authors adjusted the mathematical model for determination of coordinates of bores for satellites in the planetary gear unit according to the results of indirect measurements, developed and implemented a software algorithm to identify and reject invalid input data. Directions for further research were mapped out.

Publications with keywords:mathematical modeling, planetary gear, ill-condition tasks

Publications with words:mathematical modeling, planetary gear, ill-condition tasks

References

1. Airapetov E.L., Genkin M.D. *Statika planetarnykh mekhanizmov* [Statics of planetary mechanisms]. Moscow, Nauka, 1976. 264 p.

2. Airapetov E.L., Genkin M.D. *Dinamika planetarnykh mekhanizmov* [Dynamics of of planetary mechanisms]. Moscow, Nauka, 1980. 256 p.

3. Leont'ev Iu.A., Iampol'skii I.D., Khomiakov V.P., Leont'ev M.Iu. Opyt sozdaniia na OAO «KTZ» sudovykh reduktorov bol'shoi moshchnosti [Experience of creating at JSC "KTZ" marine reduction gears of high power]. *Iubileinyi sbornik trudov Nauchno-issledovatel'skogo Tsentra OAO «Kaluzhskii Turbinnyi Zavod»* [Jubilee collection of the works of the Scientific Research Center of JSC "Kaluga Turbine Plant"]. Kaluga, Manuskript, 2002, pp. 134-144.

4. Leont'ev M.Iu. *Issledovanie staticheskoi nagruzhennosti moshchnykh sudovykh planetarnykh reduktorov. Kand. diss.* [The study of the static loading of powerful marine planetary reduction gears. Cand. diss.]. Moscow, Institute of engineering science of RAN, 2001. 229 p.

5. Leont'ev M.Iu., Polunin I.V., Lysenkov V.S. Analiz vliianiia tochnosti izgotovleniia reduktorov GTZA na vibroaktivnost' [Analysis of influence of precision of manufacturing

reducers of the turbine-geared propulsion unit at vibration activity]. *Materialy 5 nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Vzgliad v budushchee»* [Proc. of the 5th scientific-technical conference «Looking into the Future»].St. Petersburg, TsKB MT «Rubin», 2007, pp. 319-328.

6. Leont'ev M.Iu., Nasonov D.A. Ob algoritme chislennogo resheniia odnoi iz nekorrektno zadannykh zadach, predstavliaiushchei prakticheskii interes [About the algorithm of numerical solution of one of the incorrectly specified tasks, representing practical interest]. *Materialy 5 Obshcherossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki i obrazovaniia»* [Proc. of the 5th all-Russian scientific-practical conference with international participation «Current issues of modern science and education».]. Iss. 2. Krasnoiarsk, Nauchno-innovatsionnyi tsentr, 2010, pp. 280-287.

7. D'iakonov V.P. *Mathematica 4 s paketami rasshirenii* [Mathematica 4 with bump packs]. Moscow, Nolidzh, 2000. 608 p.

8. Airapetov E.L., Aparkhov V.I., Bednyi I.A., Leont'ev M.Iu. Raschetnye issledovaniia malonagruzhennykh planetarnykh peredach [Computational studies of lightly loaded planetary gears]. *Teoriia i praktika zubchatykh peredach: trudy mezhdunarodnoi konferentsii* [Theory and practice of gears: Proc. of the International Conference]. Izhevsk, IzhGTU Publ., 1996, pp. 141-146.

9. Airapetov E.L., Aparkhov V.I., Bednyi I.A., Leont'ev M.Iu. Vliianie vesovoi nagruzki zatseplenii na dinamiku krupnogabaritnykh planetarnykh peredach [Effect of load bearing of catching on the dynamics of large planetary gears]. *Proc. of the 5-th International Conference «Dynamics of machine aggregates»*. Gabcikovo, Slovak Republic, 2000.

10. Leont'ev M.Iu., Nasonov D.A. K voprosu o vliianii pogreshnostei izgotovleniia i deformatsii satellitnogo uzla na dinamiku planetarnogo reduktora [To the question about the influence of the errors of manufacturing and deformations of satellite unit at the dynamics of planetary reduction gear]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Naukoemkie tekhnologii v priboro- i mashinostroenii i razvitie innovatsionnoi deiatel'nosti v VUZe»* [Proc. of all-Russian scientific-technical conference «Science-Intensive technologies in instrument - and mechanical engineering and the development of the innovative activities in higher educational institutions»]. Vol. 1. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. pp. 76-81.