

The results of theoretical analysis of the reverse worm gears. It is shown that the reverse worm gear having dynamic loads, which lead to wear of teeth of worm wheel. To increase the longevity of worm gears should apply a cluster lubrication or special designs worm vibrations.

УДК 621.91.002

Медведев О.А., Рожков Ю.В.

## ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СБОРОЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ МАШИН, СОДЕРЖАЩИХ ТОНКИЕ КОМПЕНСАТОРЫ

**Введение.** Наиболее широкое применение в машиностроении получила разновидность метода регулирования, основанная на быстром ступенчатом изменении одного из составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи (неподвижного компенсатора) в виде набора тонких прокладок. Этим изменением компенсируется суммарное отклонение остальных составляющих звеньев, которые изготавливаются с расширенными, экономически приемлемыми допусками.

Без компенсатора суммарное поле рассеяния составляющих

звеньев не должно превышать допуска замыкающего звена. При этом они должны быть частично совмещены, путем коррекции номинала одного из составляющих звеньев. Таким образом, за счет допуска замыкающего звена компенсируется часть суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (величины компенсации), равная (в идеале) этому допуску. При использовании одной прокладки аналогичным образом можно компенсировать, еще такую же часть суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (без учета рассеяния толщины прокладки), примыкающую к первой, и так далее.

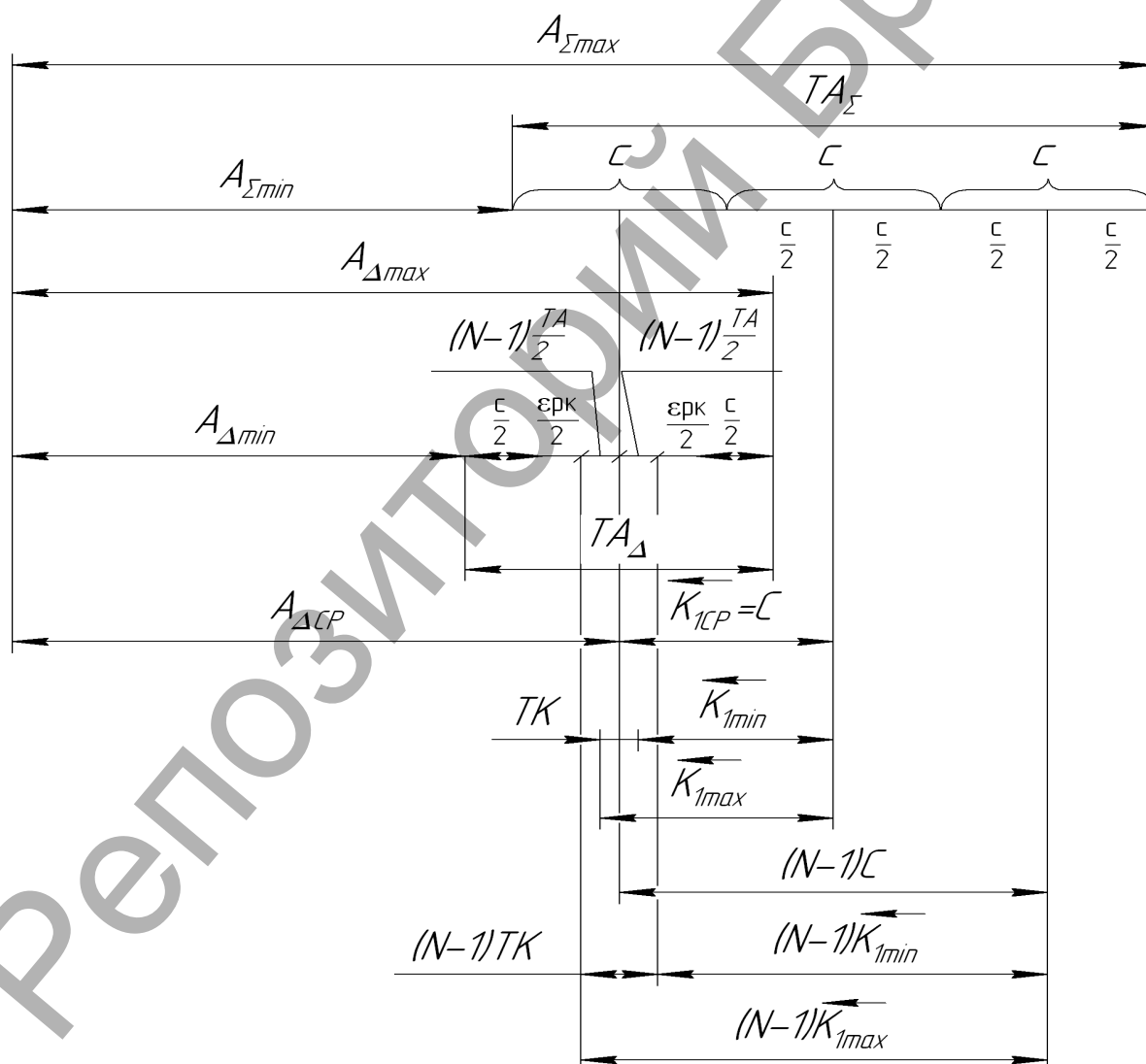


Рис. 1. Схема компенсации суммарного поля рассеяния составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких уменьшающих компенсаторов

Медведев Олег Анатольевич, к.т.н., заведующий кафедрой технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Рожков Юрий Владимирович, инженер по подготовке производства СП ОАО «Брестгазоаппарат», магистр.

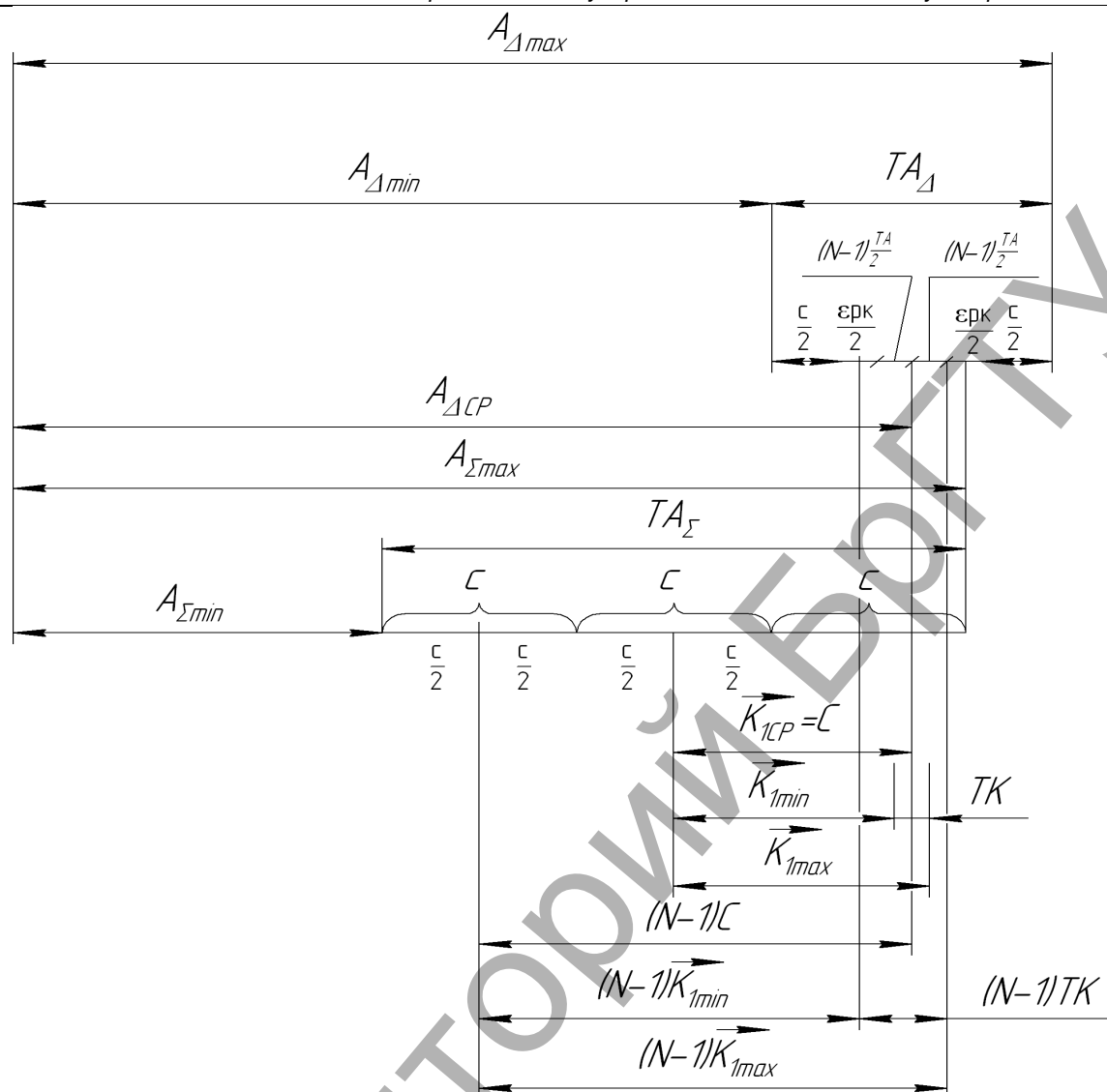


Рис. 2. Схема компенсации суммарного поля рассеяния составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких увеличивающих компенсаторов

Величина компенсатора для определенного экземпляра изделия обычно определяется измерением зазора, возникающего во время предварительной сборки изделия без компенсатора, но с эталоном на месте замыкающего звена. Число тонких компенсаторов (прокладок), нужное для окончательной сборки этого изделия определяется делением результата измерения на размер одного компенсатора.

В идеале толщина одной прокладки (ступень компенсации) равна допуску замыкающего звена. Максимальное число прокладок, которое может потребоваться в одном изделии, на единицу меньше отношения суммарного поля рассеяния составляющих звеньев к допуску замыкающего звена. В действительности ступень компенсации должна быть меньше из-за наличия погрешностей изготовления компенсаторов и погрешности определения требуемого размера компенсатора.

Анализ способов расчета размерных цепей, используемых в случае достижения точности сборки методом регулирования [1, 2, 3 и др.], позволил выявить их существенные недостатки:

- в состав величины компенсации необоснованно включается допуск изготовления компенсатора и погрешности технологической оснастки (погрешности эталона, погрешности измерения и др.), которые не формируют поле рассеивания местоположения компенсатора при предварительной сборке. Такой подход ведет к неоправданному завышению величины компенсации и числа компенсаторов. Отклонения толщины компенсатора не могут

компенсироваться самим компенсатором. Погрешности оснастки также не могут компенсироваться набором компенсаторов, так как являются случайными величинами и могут приобретать разные непредсказуемые значения при предварительной сборке одного изделия;

- допуск компенсатора назначается без учета других погрешностей формирования его размера, и, следовательно, не гарантируется точность сборки при рассчитанных параметрах компенсаторов;
- при использовании тонких прокладок не учитывается то, что допуск набора из нескольких прокладок больше допуска одной прокладки;
- традиционные методики определения параметров компенсаторов основаны на расчете размерных цепей методом максимума-минимума. Применение теоретико-вероятностного способа расчета компенсаторов позволит сократить число требуемых компенсаторов, снизить требования к точности изготовления компенсаторов и применяемой сборочной оснастки, при допустимой доле бракованных изделий.

С учетом сказанного можно сделать вывод о необходимости уточнения традиционных методик расчета компенсаторов, что позволит более рационально определять требования к точности сборочной оснастки, а так же к составу и точности компенсаторов.

**Схемы компенсации отклонений звеньев конструкторской размерной цепи.** В основе предлагаемой методики лежат схемы

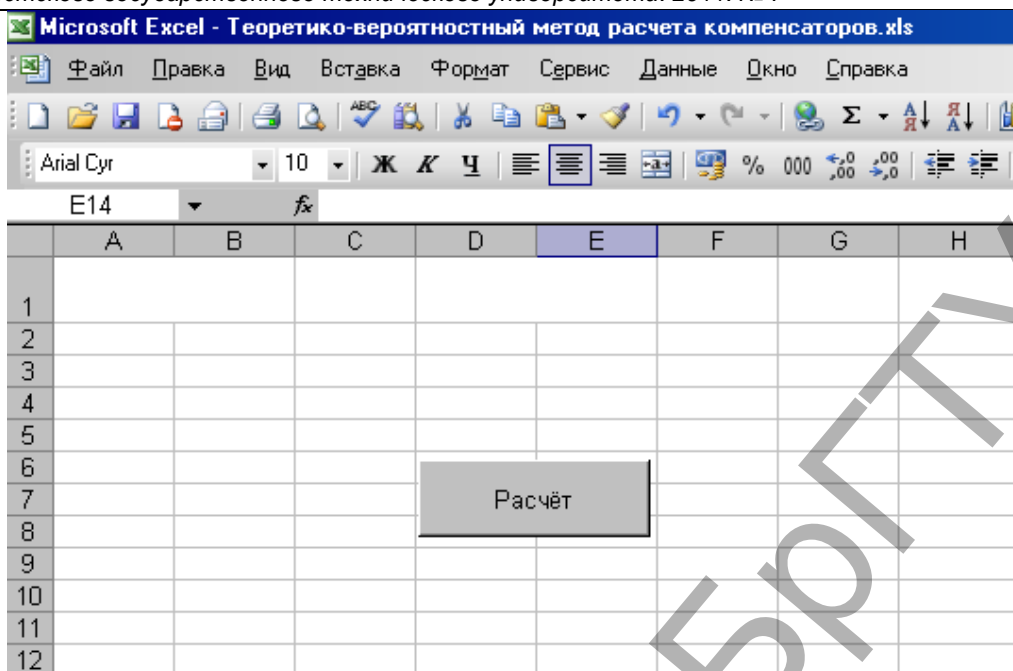


Рис. 3. Исходная таблица с кнопкой вызова формы

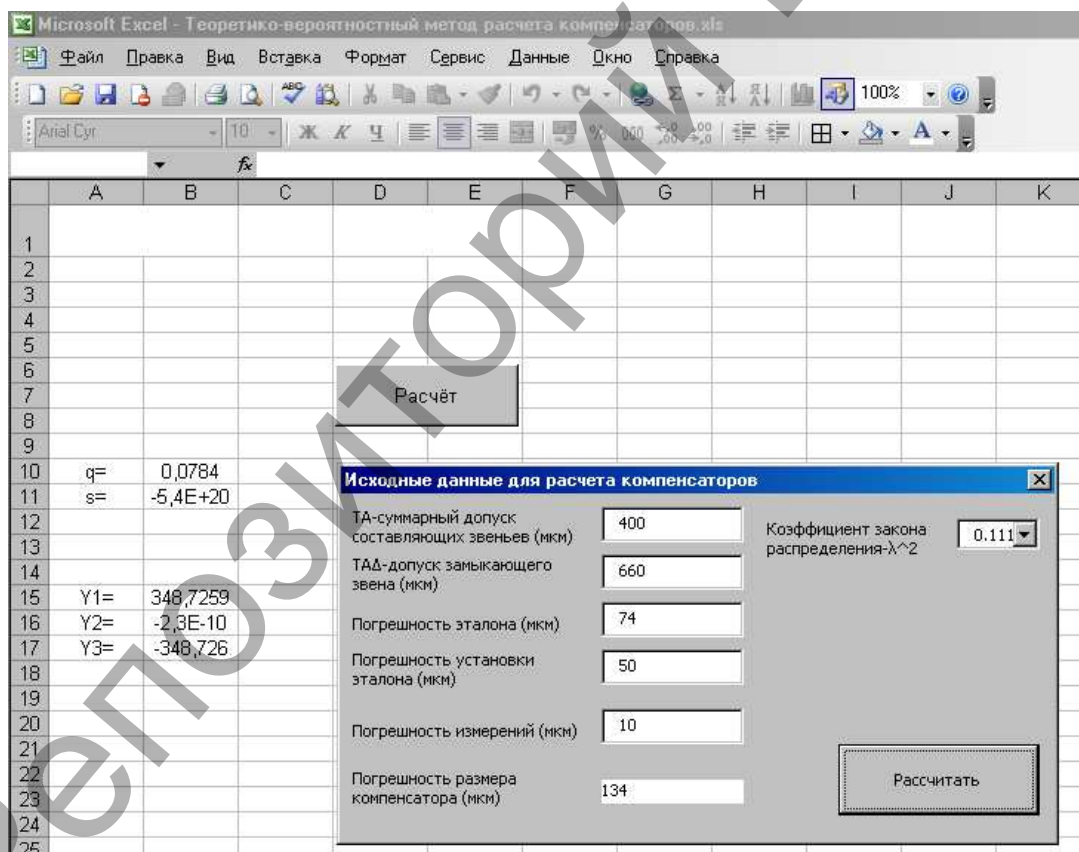


Рис. 4. Вывод результатов расчета

компенсации суммарного поля рассеяния составляющих звеньев конструкторской сборочной размерной цепи. Они представляют собой сочетание конструкторской и технологической сборочных размерных цепей. Реальная конструкторская цепь представлена в схеме компенсации математически тождественной трехзвенной цепью, состоящей из суммарного составляющего звена  $A_{\Sigma}$ , компенсатора  $K$  и замыкающего звена  $A_{\Delta}$ . Суммарное составляющее звено является алгебраической суммой всех увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев реальной цепи (кроме компенсатора), а

его допуск  $TA_{\Sigma}$  равен арифметической сумме допусков составляющих звеньев (кроме компенсатора). При этом все многообразие реальных конструкторских цепей может быть сведено к трем вариантам математически тождественных трехзвенных цепей, отличающихся по влиянию компенсатора на замыкающее звено (уменьшающий или увеличивающий компенсатор), и по расположению увеличивающего компенсатора в одной ветви цепи с суммарным составляющим звеном или в разных ветвях. В схеме компенсации каждое звено трехзвенной цепи представлено его предельными размерами и полем допуска.

Технологическая сборочная размерная цепь формируется на этапе предварительной сборки изделия, когда определяется требуемый размер компенсатора. Замыкающим звеном в ней является местоположение компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки и погрешности выполнения сборочных работ. При окончательной сборке изделия из комплектующих деталей и выбранного компенсатора, отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от эталона будет равно отклонению размера выбранного компенсатора от размера его местоположения. Это отклонение складывается из отклонений тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления эталона среднего значения замыкающего звена  $\varepsilon_{\Sigma}$ , погрешность установки эталона  $\varepsilon_{y_{\Sigma}}$ , погрешность измерения местоположения компенсатора  $\varepsilon_{U}$ , погрешность изготовления компенсаторов  $TK$ , погрешность выбора компенсатора  $\varepsilon_{\Delta}$ ). Погрешности таких звеньев не могут быть компенсированы подбором компенсатора и в сумме не должны превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Технологическая цепь представлена в схеме компенсации указанными погрешностями. При допущении о симметричном распределении суммарной погрешности, можно совместить середину ее поля рассеяния с серединой поля допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Для уменьшения требуемого числа компенсаторов целесообразно обеспечить частичное перекрытие  $TA_{\Delta}$  и  $TA_{\Sigma}$ . Это всегда можно сделать путем коррекции номинала хотя бы одного из составляющих звеньев конструкторской цепи. Для того чтобы набор компенсаторов при любом их числе оставался уменьшающим или увеличивающим, коррекция должна быть такой, чтобы совместить середину  $TA_{\Delta}$  с серединой первой ступени компенсации. При этом число компенсаторов в комплекте на одно изделие будет на единицу меньше числа ступеней компенсации  $N$ . Для гарантированного достижения точности замыкающего звена  $A_{\Delta}$  при максимальном числе требуемых компенсаторов  $(N-1)$  в схеме компенсации учтен суммарный допуск этого числа прокладок  $(N-1)TK$ .

Степень компенсации «с» равна средней толщине одного компенсатора (обычно не менее 0,1мм). Величина ступени компенсации, по сути, является максимальным значением погрешности выбора компенсатора, которая равна разности между номинальным размером принятого набора прокладок и размером местоположения компенсатора. С такой погрешностью измеренное значение компенсатора воспроизводится на выбранном наборе прокладок в самом неблагоприятном случае. Поэтому степень компенсации вместе с погрешностями формирования размера компенсатора и полем рассеяния размера набора компенсаторов определяет точность сборки и должна вписываться в поле допуска замыкающего звена  $TA_{\Delta}$ .

Схемы компенсации суммарного поля рассеяния составляющих звеньев, разработанные с учетом описанных положений для уменьшающего и увеличивающего компенсатора, приведены на рисунках 1 и 2, соответственно. На схемах сумма  $\varepsilon_{\Sigma}$ ,  $\varepsilon_{y_{\Sigma}}$ ,  $\varepsilon_{U}$  обозначена как погрешность формирования размера компенсатора  $\varepsilon_{PK}$ .

**Взаимосвязь точности замыкающего звена, компенсаторов и сборочной оснастки.** Исходя из схем компенсации, увязка предельных размеров суммарного составляющего звена с полем допуска замыкающего звена конструкторской цепи производится по следующим уравнениям:

$$\text{Для уменьшающего компенсатора} \\ A_{\Sigma \min} = A_{\Delta \text{ср}} - c/2. \quad (1)$$

$$\text{Для увеличивающего компенсатора} \\ A_{\Sigma \max} = A_{\Delta \text{ср}} + c/2. \quad (2)$$

Если в качестве основы расчета точности компенсаторов и сборочной оснастки использовать метод максимума-минимума, то в соответствии с предложенными схемами компенсации полей рассе-

яния составляющих звеньев конструкторской сборочной цепи условие достижения точности сборки при любом (в пределах  $N-1$ ) числе компенсаторов в наборе примет вид [4]

$$TA_{\Delta} \geq \varepsilon_{PK} + c + (N-1) \cdot TK. \quad (3)$$

Для сокращения числа компенсаторов в комплекте следует принять максимально допустимое значение  $c$ , при котором условие (3) превращается в равенство.

Значение допусков составляющих звеньев конструкторской и технологической цепей следует выбирать так, чтобы значение  $N$  получалось целым.

Проведенный анализ формирования точности замыкающего звена методом регулирования и предложенные схемы компенсации поля рассеяния составляющих звеньев конструкторской цепи позволяют использовать теоретико-вероятностный метод определения параметров точности компенсаторов и сборочной оснастки. Его использование позволит получить преимущества, аналогичные тем, которые получают при достижении точности сборки методом неполной взаимозаменяемости [1, 2], то есть, допуская небольшую экономически приемлемую долю бракованных изделий, существенно снизить число компенсаторов в комплекте на одно изделие или снизить требования к точности сборочной оснастки. Для составления условия достижения точности замыкающего звена на основе теоретико-вероятностного подхода будем считать звенья технологической размерной цепи случайными величинами и преобразуем выражение (3) с учетом правила сложения полей рассеяния случайных величин [1]

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{n+m} \lambda_j^2 \cdot \omega_j^2, \quad (4)$$

где  $\omega_{\Delta}$  – поле рассеяния суммарной случайной величины;  $t_{\Delta}$  – коэффициент риска;  $\lambda_j$  – коэффициент относительного рассеяния  $J$ -той случайной величины;  $\omega_j$  – поле рассеяния  $J$ -той случайной величины.

Коэффициент риска замыкающего звена  $t_{\Delta}$  в формуле (4) учитывает допустимую долю бракованных изделий. Его можно определить по таблице значений функции Лапласа  $\Phi(t_{\Delta})$ .

Заменив в формуле (4)  $\omega_{\Delta}$  на  $TA_{\Delta}$  и  $\omega_j$  на погрешности, определяющие точность замыкающего звена, из (3) получим

$$TA_{\Delta}^2 = (\lambda_{PK}^2 \cdot \varepsilon_{PK}^2 + \lambda_c^2 \cdot c^2 + \lambda_k^2 \cdot (N-1) \cdot TK^2). \quad (5)$$

Заменив в уравнении (5) число ступеней компенсации  $N$  на правую часть уравнения (6)

$$N = TA_{\Sigma} / c \quad (6)$$

после преобразований получим кубическое уравнение для расчета значения ступени компенсации  $c$

$$\lambda_c^2 \cdot c^3 + \left[ \lambda_{PK}^2 \cdot \varepsilon_{PK}^2 - \left( \frac{TA_{\Delta}}{t_{\Delta}} \right)^2 - \lambda_k^2 \cdot TK^2 \right] \cdot c + TA_{\Sigma} \cdot \lambda_k^2 \cdot TK^2 = 0. \quad (7)$$

Применение полученного неполного кубического уравнения на практике для установления взаимосвязи между параметрами точности замыкающего звена, компенсаторов и технологической сборочной оснастки возможно при использовании типового или специального программного обеспечения, так как аналитическое решение кубических уравнений «ручным» способом сопряжено с большими затратами времени.

**Программное обеспечение для расчета параметров точности компенсаторов и сборочной оснастки.** Для реализации данной методики в приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) разработана компьютерная программа, вычисляющая корни уравнения (7) ( $Y1 = c_1, Y2 = c_2, Y3 = c_3$ ) по формулам Кардано. Исходными данными для расчёта являются:  $TA_{\Sigma}$  – суммарный допуск составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (мм);

$TA_{\Delta}$  – допуск замыкающего звена (мм); погрешность эталона (мм); Погрешность установки эталона (мм); погрешность измерений (мм);  $\lambda^2$  – коэффициент закона распределения. При запуске программы в рабочем окне появляется исходная таблица с кнопкой вызова формы (рис. 3). При щелчке по кнопке "Расчёт" происходит вызов формы расчёта (рис. 4).

Выбор закона распределения производится из выпадающего меню. Коэффициенты относительного рассеяния (для закона равной вероятности  $\lambda^2 = 1/3$ , для закона Симпсона  $\lambda^2 = 1/6$ , для нормального закона распределения  $\lambda^2 = 1/9$ ) занесены в таблицу в защищенные ячейки, откуда затем и происходит их считывание. В поле "Погрешность размера компенсатора" происходит автоматический расчет допуска толщины компенсатора при вводе исходных данных в поля: "Погрешность эталона"; "Погрешность установки эталона"; "Погрешность измерений".

С помощью данной программы проведены расчеты значений ступени компенсации при различных сочетаниях параметров точности компенсаторов и технологической сборочной оснастки. Результаты расчетов сведены в таблицы, которыми можно пользоваться на производстве для установления взаимосвязи между указанными параметрами точности, не применяя компьютер.

**Заключение.** Многочисленные расчеты числа компенсаторов для размерных цепей плунжерных насосов, червячных редукторов и других изделий, выполненные методом максимума-минимума по методике, изложенной в [4], и предлагаемым теоретико-

**MEDVEDEV O.A., ROZHKOVA Y.V. Probability theory calculation of assembly machines dimensional circuits containing thin compensators**

The purpose of this paper is to present a systematic method of probabilistic calculation of the parameters of accuracy compensators and assembly tooling used to achieve precision assembly machines by regulation. Offered rational compensation scheme extended field scattering component units, depending on the mathematical and software to calculate the precision joints and assembly tooling.

УДК 531

**Русан С.И., Чудакоў Д.М.**

**АНАЛІЗ РАЎНАВАГІ МЕХАНІЗМА СА СЛІЗГАЛЬНЫМ ЗЛУЧЭННЕМ ЗВЕННЯЎ**

**Агульныя заўвагі.** Пытанне разглядаецца ў рамках вучэбнага курса тэарэтычнай механікі. У мадэлях аб'ектаў тэхнікі, што аналізуюцца ў вучэбным працэсе, як правіла, ігнаруюцца асобныя геаметрычныя і фізічныя параметры рэальных аб'ектаў (напрыклад, у механічнай сістэме, што паказана на рысунку 1, не ўлічваецца даўжыня звяна 3 і трэнне паміж ім і звяном 2). Пытанні, як улічваць гэтыя параметры і наколькі зніжаецца дакладнасць разлікаў на падставе набліжаных мадэляў, на занятках не разглядаюцца. Мэта нашага артыкула — паказаць магчымасць і выкладкі методу прымянення тэарэтычных палажэнняў падручніка да разліку мадэляў, максімальна набліжаных да рэальных аб'ектаў тэхнікі. Прыведзена тут даследаванне можа быць карысным як для дапытлівых студэнтаў, так і для маладых спецыялістаў — інжынераў і выкладчыкаў тэарэтычнай механікі.

**Пастаноўка задачы.** Рычажныя механізмы са слізгальным злучэннем звянаў шырока распаўсюджаны ў тэхніцы. У працэсе работы на механізм дзейнічаюць актыўныя сілы і сілы супраціўлення. У рабочым рэжыме механізма рух звянаў стабілізуецца, і паміж названымі сіламі наступае раўнавага. У ціхходных механізмах сілы інерцыі можна ігнараваць. Тады разлік сілавых параметраў зводзіцца да рашэння задачы статыкі. У такой пастаноўцы ніжэй аналізуецца раўнавага крывашыпна-куліснага механізма, што складаецца з трох рухомых звянаў (рыс. 1): крывашыпа 1, шатуна 2 і ўтулкі (каромысла) 3, замацаванай шарнірна на апоры  $O_2$ . Асаблівасць канструкцыі заключаецца ў тым, што звенні 2 і 3 утвараюць вышэйшую кінематычную пару — кантакт паміж звеннямі мае месца толькі ў пунктах C і D. Аналіз сілавога

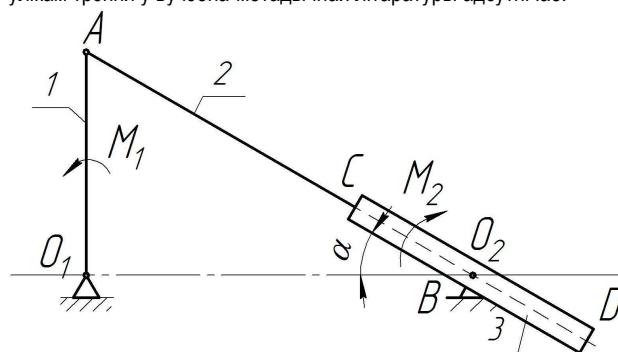
вероятностным методом, показали, что, рискуя 3 изделиями из 1000 (при коэффициенте риска  $t_{\Delta} = 3$ ), можно сократить число требуемых компенсаторов, в среднем, в полтора раза. Таким образом, предлагаемая методика теоретико-вероятностного расчета компенсаторов позволяет избежать необоснованно высоких требований к точности сборочной оснастки, сократить число компенсаторов в комплекте на одно изделие и сократить себестоимость сборки. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Палей, М.А. Допуски и посадки: справочник в 2 ч. / М.А. Палей [и др.] – СПб.: Политехника, 2001. – Ч.2. – 608 с.
2. Проектирование технологических процессов сборки машин: учебник / Под общ. ред. А.А. Жолобова. – Мн.: Новое знание, 2005. – 410 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Выбор технологической оснастки для достижения точности сборки методом регулирования неподвижных компенсаторов / О.А. Медведев, П.Н. Ковальчук // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест. – 2008. – №4(52): Машиностроение, автоматизация, ЭВМ. – С. 40–44.

Материал поступил в редакцию 26.10.11

ўраўнаважвання механізма з несіметрычнымі параметрамі ўтулкі і ўлікам трэння ў вучэбна-метадычнай літаратуры адсутнічае.



**Рис. 1.** Схема рычажного механизма: 1 – крывашып; 2 – шатун; 3 – муфта (каромысел)

Канкрэтызуем умову. Зададзены момант  $M_1$  актыўнай пары на крывашыпе, геаметрычныя параметры механізма  $O_1A = r$ ,  $O_2C = a_1$ ,  $O_2D = a_2$ .  $\alpha$  і каэфіцыенты трэння слізгання  $f_1$ ,  $f_2$  у пунктах C і D адпаведна (рыс. 2). Вызначыць абсяг (дыяпазон) змянення моманту пары  $M_2$ , неабходнай для ўраўнаважвання актыўнай пары  $M_1$ . Пара  $M_2$  можа быць прыкладзена як да звяна 3, так і да звяна 2. Абодва варыянты разгледзім далей паасобку.

**Яксны аналіз задачы.** Задачу будзем рашаць паводле ураўненняў геаметрычнай статыкі. Іншы падыход апісаны ў артыкуле

**Русан С.И., Чудакоў Д.М.** Барановіцкі дзяржаўны ўніверсітэт. Беларусь, БарГУ, 225404, Брэстская вобласць, г. Барановічы, ул. Войкова 21.