

УДК 621.9.08

## ПОГРЕШНОСТИ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СТАНКОВ С ЧПУ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ

© 2012 М. А. Болотов<sup>1</sup>, А. Н. Жидяев<sup>1</sup>, О. С. Сурков<sup>1</sup>, Н. В. Тяпаев<sup>2</sup>, И. В. Папсуев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Закрытое акционерное общество «Радио-Волга-ТВ», г. Самара

<sup>3</sup>Открытое акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Проведены исследования погрешностей контактных измерительных средств станков с ЧПУ. Рассмотрена схема погрешности измерения линейного геометрического параметра, выявлены основные источники ошибок. Рассмотрен вопрос о возможности нормирования погрешностей измерительных средств станков с ЧПУ в соответствии с требованиями нормативных документов для координатно-измерительных машин ISO10360 и методикой поверки МИ2569-99.

*Погрешность, контактный метод, станок с ЧПУ, контроль.*

Контактные измерительные средства оборудования с ЧПУ используются в процессе определения положения заготовки относительно осей оборудования и для измерения ряда линейно-угловых геометрических параметров [1]. В практике расчёта результирующей геометрической точности необходимо учитывать погрешности, вносимые в процессе определения положения заготовки и измерения геометрических параметров. Использование измерительных средств оборудования затруднено тем фактом, что они не являются официальным средством измерения и в паспорте оборудования отсутствуют оценки инструментальных погрешностей, подобно тому как это указывается для координатно-измерительных машин. Несмотря на это, если фактические погрешности измерения не превышают допустимого уровня, то измерительные средства могут успешно использоваться для межоперационного и внутриоперационного контроля, что может быть экономически обоснованным. В связи с этим актуальной задачей является определение инструментальных погрешностей измерений таких средств.

Нормирование и описание инструментальных погрешностей измерения координатно-измерительных машин осуществляются с помощью указания погрешности измерительной головки, а также интервальной оценки, зависящей от длины [2 - 5]:

$$E_{L, MPE} = \pm (A + L/K), \quad (1)$$

где  $A$  и  $K$  – коэффициенты,

$L$  – измеряемая длина в пределах рабочего объёма координатно-измерительной машины, мм.

Для обеспечения единства соответствия метрологических характеристик исследование погрешностей измерения оборудования с ЧПУ необходимо проводить с учётом используемых способов нормирования и оценки.

По этой причине исследование погрешностей измерения осуществлялось с использованием аттестованных эталонных концевых мер длины 3-го класса точности размером 200...500 мм и колец размером 25 и 40 мм. Измерения проводились при температуре 27°C в производственных условиях. Изменения температуры при проведении эксперимента составляло не более 0,5°C. Выполнение измерений осуществлялось автоматически по разработанной программе на обрабатывающем центре MikronUCP 800 Duo. В ходе эксперимента соблюдались одинаковая скорость подвода и усилие воздействия измерительного наконечника на измеряемую поверхность. Рассматривалось влияние двух факторов:

1) влияние длины измеряемой концевой меры;

2) влияние расположения концевой меры длины относительно осей оборудования.

Измерения концевых мер длины проводились в соответствии со схемой, приведённой на рис.1.

Оценка результатов экспериментов осуществлялась с помощью показателей: размах вариации (который равен разности между наибольшим и наименьшим значениями в выборке), среднеквадратичное отклонение и среднее значение. В табл. 1 приведены результаты измерения концевых мер длины с разной длиной.

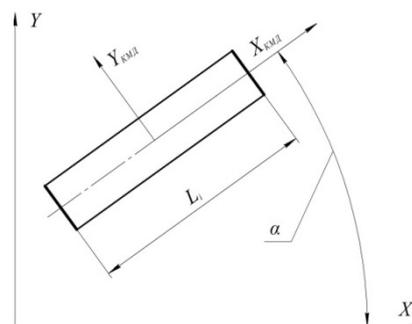


Рис.1. Схема расположения концевых мер длины по отношению к осям оборудования

Таблица 1. Результаты эксперимента по оценке влияния измеряемой длины на погрешность измерения линейного геометрического параметра, мм

Параметр	200 мм	300 мм	400 мм	500 мм
Размах вариации	0,0011	0,0018	0,0026	0,0036
СКО	0,00027	0,00037	0,00049	0,00073
Среднее	0,00270	0,00242	0,00252	0,00316

Анализируя результаты, нетрудно заметить, что с возрастанием измеряемой длины происходит рост погрешности измерения. В соответствии с (1) получена величина интервальной оценки погрешности измерения линейного геометрического параметра (в мкм), зависящего от длины  $L$  (мм) [5]:

$$\Delta = 0,6 + L/125. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию расположения концевой меры с длиной 200 мм относительно осей оборудования. Эксперимент направлен на оценку суммирования погрешностей от осей оборудования.

Таблица 2. Результаты эксперимента по оценке влияния расположения меры длиной 200 мм относительно осей станка, мм

Параметр	0° (вдоль оси X)	30°	45°	60°	90° (вдоль оси Y)
Размах вариации	0,0011	0,0011	0,0019	0,0010	0,0019
СКО	0,00027	0,00028	0,00046	0,00030	0,00049
Среднее	0,00270	0,00349	0,00543	0,00733	0,00843

Анализируя результаты эксперимента, можно отметить, что наблюдается рост случайной и систематической погрешностей при приближении оси концевой меры длины к оси Y. Однако для некоторых углов (например, для 30 и 60°) он нарушается, что можно объяснить влиянием биения оси шпинделя, так как измерительный датчик установлен в

шпинделе и позиционируется вдоль рабочего направления, т.е. касание всегда происходит с одной и той же областью датчика.

В табл. 3 приведены результаты эксперимента по влиянию измеряемого диаметра кольца на геометрические параметры: диаметр и координаты центра отверстия.

Таблица 3. Результаты эксперимента по оценке влияния диаметра кольца на погрешность измерения геометрических параметров, мм

Параметр	Диаметр		Координата центра по X		Координата центра по Y	
	Ø25	Ø40	Ø25	Ø40	Ø25	Ø40
Размах вариации	0,0008	0,0016	0,0005	0,0013	0,0014	0,0016
СКО	0,00019	0,00030	0,00014	0,00022	0,00034	0,00049
Среднее	-0,0053	-0,00558	0,00041	-0,00003	0,00071	-0,00235

Анализируя результаты эксперимента, можно отметить, что при увеличении диаметра кольца происходит увеличение случайной составляющей погрешностей измерения геометрических параметров диаметра и координат центра. Поскольку диаметр кольца достаточно мал, то случайная составляющая погрешности определяется в большей степени погрешностями измерения датчика. В соответствии с паспортными данными повторяемость в точке контакта датчика, оценённая среднеквадратичным отклонением, составляет 0,0005 мм (при скорости измерения 480 мм/мин и длине стилуса 50 мм).

При проведении эксперимента скорость измерения составляла 300 мм/мин, длина стилуса 50 мм.

Приведём теоретические положения оценки погрешностей измерения геометрического параметра «расстояние» для измерительных средств оборудования с ЧПУ. Основные источники возникновения погрешностей координатных измерений приведены в [6].

Рассмотрим одномерную схему (рис.2), отражающую источники погрешностей, возникающих в процессе измерения контактной системой.

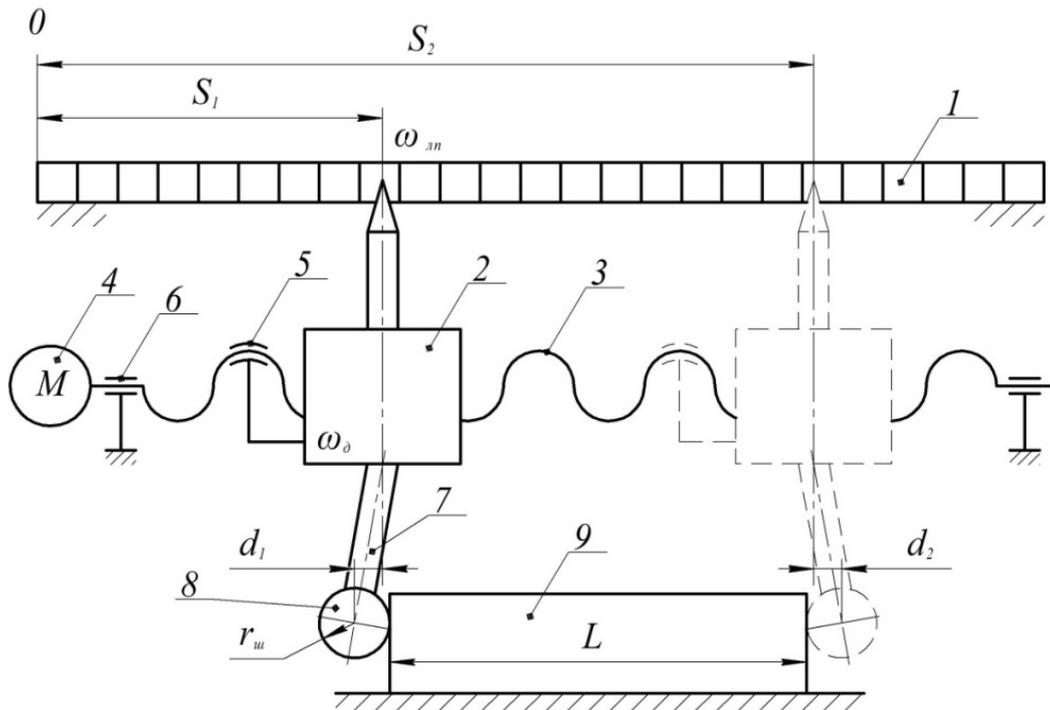


Рис. 2. Схема, отражающая источники погрешностей контактной системы:

1 - датчик линейных перемещений; 2 - контактный датчик; 3 - шариковинтовая пара; 4 - привод; 5 - гайка; 6 - подшипниковая опора; 7 - ножка цуны; 8 - измерительный наконечник с радиусом  $r_{ш}$ ; 9 - измеряемый объект

В соответствии с рис. 2 можно записать следующее выражение для измеряемого расстояния  $L$ :

$$L = S_2 - S_1 + d_2 - d_1, \quad (3)$$

где  $S_2$  – показание датчика линейных перемещений в положении 2;

$S_1$  – показание датчика линейных перемещений в положении 1;

$d_2$  – показание контактного датчика в положении 2;

$d_1$  – показание контактного датчика в положении 1.

Рассмотрим случай измерения линейного геометрического параметра. В одно-

мерной постановке погрешность измерения  $\omega_l$  линейного геометрического параметра  $L$  складывается из следующих компонент:

$$\omega_l = \sqrt{\omega_d^2 + \omega_{ш}^2}, \quad (4)$$

где  $\omega_d$  – погрешность измерения контактного датчика;

$\omega_{ш}$  – погрешность измерения датчика линейных перемещений.

Рассмотрим случай в двухмерной постановке, в котором действуют погрешности по двум осям (рис.3).

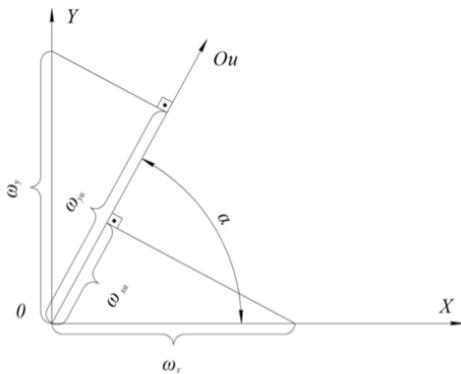


Рис.3. Схема суммирования погрешностей измерения

При известных погрешностях отдельно по направлениям осей  $X$  и  $Y$  можно определить погрешность в направлении произволь-

ной оси  $O_n$  в двумерной постановке. Учитывая векторный характер величин, необходимо определить проекции погрешностей  $\omega_x$  и  $\omega_y$  на ось  $O_n$ , т.е.  $\omega_{x\alpha}$  и  $\omega_{y\alpha}$ :

$$\omega_{x\alpha} = \omega_x \cos \alpha; \quad \omega_{y\alpha} = \omega_y \sin \alpha. \quad (5)$$

Тогда суммарная погрешность вдоль оси  $O_n$  определяется по формуле

$$\omega_{\Sigma} = \sqrt{(\omega_x \cos \alpha)^2 + (\omega_y \sin \alpha)^2}. \quad (6)$$

Для проверки и подтверждения модели разработаем модель погрешности измерения в двумерной постановке с использованием численного метода Монте-Карло [7] (рис.4).

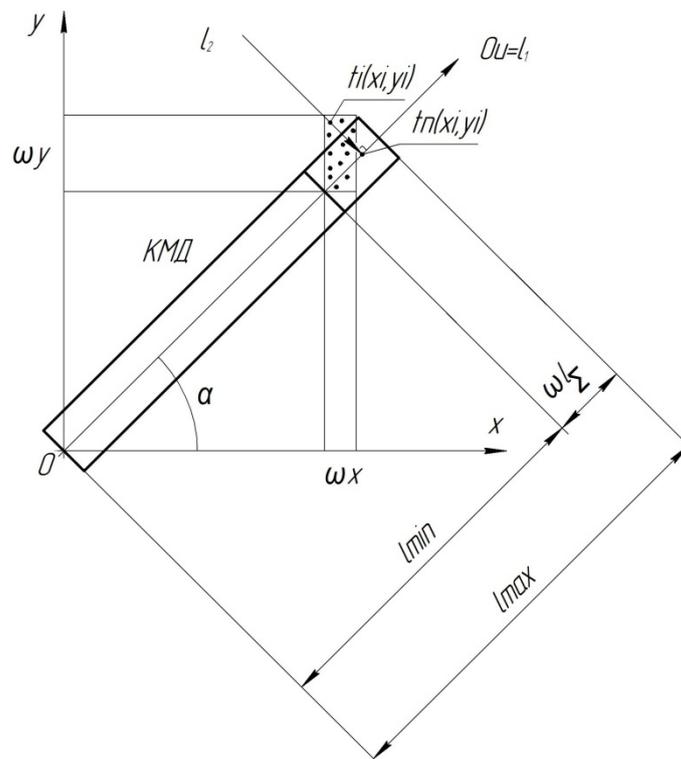


Рис. 4. Схема моделирования погрешности измерения линейного геометрического параметра для двумерной постановки

В пределах рабочей плоскости стола оборудования размещена моделируемая концевая мера длины под углом  $\alpha$  к оси  $X$  (вдоль оси  $O_n$ ). При измерении длины меры вносятся ошибки датчиками линейных перемещений по осям  $X$ ,  $Y$ , соответственно  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ . На плоскости образуется прямоугольная область вероятных положений отсчётов в виде точек. Измеряемое расстояние вычисляется как Евклидово расстояние между точкой отсчёта  $(0,0)$  и точкой  $t_n(x_i, y_i)$ , получаемой проекцией точек  $t_i(x_i, y_i)$  на прямую  $l_1$ , совпадающую с

осью  $O_n$ . Проекция определяется как пересечение прямой  $l_2$ , перпендикулярной прямой  $l_1$ . В итоге формируются минимальная  $l_{\min}$  и максимальная  $l_{\max}$  измеряемые длины и соответствующая область рассеивания линейного геометрического параметра  $\omega_{\Sigma}$ .

Ошибки, вносимые датчиками линейных перемещений по соответствующим осям, моделировались генератором случайных чисел, встроенным в систему MATLAB. Количество реализаций составляло 100 000.

Если моделируемое распределение погрешностей измерений датчиков линейных перемещений нормальное, то распределение результирующего линейного геометрического параметра также является нормальным. В случае, если моделируемое распределение погрешностей измерений датчиков линейных перемещений равновероятное, то распределение результирующего линейного геометрического параметра также является равновероятным. При моделировании распределения по одной из осей нормального, а по другой равновероятного наблюдается композиция законов в зависимости от угла  $\alpha$ .

В ходе вычислений установлено, что результаты соотносятся с полученной зависимостью (6). Результаты моделирования для исходных параметров табл. 2 приведены на рис. 5.

Отличие полученных теоретических и экспериментальных данных можно объяснить влиянием биения шпинделя, в который устанавливается измерительный датчик. Таким образом, необходимо учитывать биение шпинделя и повторяемость установки измерительного датчика в шпиндель.

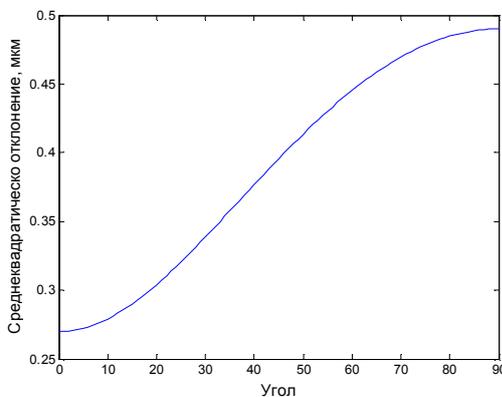


Рис. 5. Результаты суммирования погрешностей в плоскости

Для трёхмерной постановки задачи необходимо определить действующую погрешность в направлении оси Z.

В этом случае суммарная погрешность может быть вычислена по формуле:

$$\omega_z = \sqrt{(\omega_x \cos\alpha \cos\beta)^2 + (\omega_y \sin\alpha \cos\beta)^2 + (\omega_z \sin\beta)^2}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – угол между плоскостью  $XoY$  и осью  $O_z$ , на которую осуществляется проецирование погрешностей и вдоль которой происходит измерение.

Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о том, что измерительные системы оборудования с ЧПУ могут использоваться для контроля множества линейно-угловых геометрических параметров деталей с точностью, соответствующей шестому качеству при условии обеспечения термостабильных условий.

При моделировании измерения геометрических параметров, отличающихся от условий аттестации, необходимо учитывать, что результирующая погрешность измерения будет зависеть от вида измеряемого геометрического параметра. Поскольку процесс измерения является координатным, то для его моделирования можно использовать методики, приведённые в [8].

Данная научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### Библиографический список

1. Руководство пользователя по измерительным системам Renishaw.
2. ISO 10360-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 1: Vocabulary. Геометрические характеристики изделий (GPS). Приёмочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (CMM) [Текст]: Ч. 1: Терминология. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 54 с.
3. ISO 10360-2:2009 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. Геометрические спецификации изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (CMM) [Текст]: Ч. 2: CMM, используемые для линейных измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 36 с.
4. ISO 10360-5:2010 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 5: CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems. Гео-

метрические характеристики изделий (GPS). Приёмочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ) [Текст]: Ч. 5: Координатно-измерительные машины с контактными измерительными системами с несколькими щупами. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 46 с.

5. МИ 2569-99 ГСИ. Машины координатно-измерительные портального типа. Методика поверки.

6. Гапшис, В.А. Координатные измерительные машины и их применение [Текст]: учеб. / В.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

7. Соболев, М.И. Метод Монте-Карло [Текст] / М. И. Соболев. – изд. 2-е, испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. – 63 с.

8. Болотов, М.А. Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно измерительных машинах [Текст] / М.А. Болотов, И.А. Лёзин // Вестн. СГАУ. – Самара: СГАУ, 2011. – №2 (26). – С. 140-150.

9. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения [Текст]: учеб. пособие для ВТУЗов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Академия, 2003. – 459 с.

10. Техническое описание станка Mikro-UCP800Duro.

## NC MACHINE TOOLS CONTACT MEASURING DEVICES UNCERTAINTY WHEN PRODUCTS GEOMETRICAL PARAMETERS CONTROL

© 2012 M. A. Bolotov<sup>1</sup>, A. N. Zhidyaev<sup>1</sup>, O. S. Surkov<sup>1</sup>, N. V. Tyapaev<sup>2</sup>, I. V. Papsuev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup>JSC «Radio-Volga-TV», Samara

<sup>3</sup>JSC «Kuznetsov», Samara

Study of NC machine tools contact measuring devices uncertainty accomplished. Linear geometrical parameter measuring uncertainty diagram considered, errors main sources revealed. The question about NC machine tools measuring devices uncertainty normalizing possibility according to normative documents requirements for coordinate measuring machines ISO10360 and methodology of inspection MI2569-99 considered.

*Uncertainty, contact method, NC machine tool, control.*

### Информация об авторах

**Болотов Михаил Александрович**, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [maikl.bol@gmail.com](mailto:maikl.bol@gmail.com). Область научных интересов: координатные измерения.

**Жидяев Алексей Николаевич**, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [a.n.zhidyaev@gmail.com](mailto:a.n.zhidyaev@gmail.com). Область научных интересов: обработка сложных поверхностей.

**Сурков Олег Станиславович**, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Область научных интересов: обработка сложных поверхностей.

**Тяпаев Николай Владимирович**, инженер, Закрытое акционерное общество «Радио-Волга-ТВ». E-mail: [kinform@mail.ru](mailto:kinform@mail.ru). Область научных интересов: координатные измерения.

**Папсуев Игорь Владимирович**, первый заместитель исполнительного директора – главный инженер, Открытое акционерное общество «КУЗНЕЦОВ». E-mail: [motor@kuznetsov-motors.ru](mailto:motor@kuznetsov-motors.ru). Область научных интересов: производство ГТД.

**Bolotov Michael Alexandrovich**, engineer of aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [maikl\\_bol@rambler.ru](mailto:maikl_bol@rambler.ru). Area of research: coordinate measurement.

**Zhidyaev Alexey Nikolaevich**, engineer of aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [a.n.zhidyaev@gmail.com](mailto:a.n.zhidyaev@gmail.com). Area of research: machining of airfoil.

**Surkov Oleg Stanislavovich**, assistant professor of aircraft engine production department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Area of research: machining of airfoil.

**Tiapaev Nikolai Vladimirovich**, engineer, JSC «Radio-Volga-TV». E-mail: [kin-form@mail.ru](mailto:kin-form@mail.ru). Area of research: coordinate measurement.

**Papsuev Igor Vladimirovich**, first deputy of executive director – chief engineer, JSC «Kuznetsov». E-mail: [motor@kuznetsov-motors.ru](mailto:motor@kuznetsov-motors.ru). Area of research: GTE production.