

УДК 621.75

DOI: 10.30987/article_5cb58f4f589ff6.30206728

Е.А. Польский, С.В. Сорокин

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ НАУКОЕМКИХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Представлены результаты исследований по технологическому обеспечению требуемых параметров надежности сборочных узлов трения на основе анализа изменения параметров точности и качества функциональных поверхностей контактирующих деталей на этапах эксплуатации. Разработаны рекомендации по оптимизации выбора материала контактирующих деталей, корректировке

параметров качества функциональных поверхностей и предельных отклонений размеров с учетом их изменений на этапах механической обработки и сборки.

Ключевые слова: надежность, качество поверхности, работа силы трения, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств.

E.A. Polsky, S.V. Sorokin

RELIABILITY TECHNOLOGICAL SUPPORT OF FRICTION UNIT PARTS OF SCIENCE INTENSIVE ASSEMBLY UNITS

The paper reports the results of investigations on technological support of reliability indices for assembly units taking into account changes of contacting functional dimensions of single machine parts at the operation stage. At the heart of the work there is an analysis of dimension ties of an assembly unit ensuring a correlation between some basic stages of a product life cycle at which product quality is formed: designing with the quality parameter standardization of a surface

and functional dimension accuracy, manufacturing with the definition of technological parameters and confirmation of accuracy achieved at separated operations and an operation at which changes of quality and accuracy parameters takes place.

Key words: reliability, surface quality, friction force work, technological support of operation properties.

Введение

Работа машин и агрегатов современной техники происходит с возрастающими скоростями и нагрузками, при высоких и низких температурах, в агрессивных средах и вакууме. Повышаются требования к надежности и долговечности наряду со стремлением к упрощению и удешевлению разрабатываемых конструкций, к технологичности вырабатываемых продуктов.

Вследствие недостаточно обоснованного выбора материалов для деталей пар трения скольжения сроки службы машин и агрегатов уменьшаются, возрастает количество ремонтных работ, а следовательно, снижается производительность из-за дополнительных простоев оборудования. От выбранного материала зависит конструктивное оформление узла трения. Конструкции деталей разрабатываются исходя из свойств материалов таким образом, чтобы наиболее полно использовать низкий коэффициент трения и высокую изно-

состойкость материала, при этом сведя до минимума или полностью устранив вредное влияние отрицательных характеристик материала (недостаточная прочность, хрупкость, низкая теплопроводность, нестабильность во времени размеров и геометрических параметров качества трущихся поверхностей).

Таким образом, выбор конкретного материала деталей пары трения осуществляется в условиях наличия многих критериев. При этом для ряда критериев характерна неполнота и неточность информации, необходимой для оценивания, вследствие чего подобного типа задачи обычно решаются проектировщиком на интуитивном уровне, с использованием эвристических подходов, а зачастую методом проб и ошибок.

При сборке и эксплуатации размерные связи не остаются постоянными [1; 2]. На машину будут воздействовать внешние

и внутренние факторы, которые приводят к снижению надежности. Такие воздействия необходимо учитывать для комплексного обеспечения точности пар трения скольжения, поэтому для размерных цепей следует выделить еще одну группу размеров – эксплуатационные размеры. Они описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия.

Разработка и применение средств программной поддержки решения таких задач, ключевую роль в которой играет определение критериев выбора и построение соответствующих математических моделей, учитывающих структуру и специфику исходной информации, позволит проектировщику более детально и последовательно отразить и формализовать свои предпочтения, заранее оценить и проанализировать последствия выбора каждого решения, исключить недопустимые варианты и выделить наиболее удачные решения, вследствие чего сократить сроки проектирования, повысить научную и инженерную обоснованность и снизить субъективный фактор принимаемых решений.

Концепция предлагаемой методики и результаты исследований

Для расчета величины износа и температурного режима известны зависимости [1]. При выборе материала по условию теплостойкости нередко пользуются упрощенным критерием – характеристикой $[pv]$, где v – окружная скорость вала, но этот критерий весьма серьезно критикуется [3]. При увеличении нагрузки на поверхность контакта давление на единичном пятне существенно не изменяется, а увеличивается число пятен контакта, так как условие нагруженности на одном пятне контакта сохраняется. В условиях же работы подшипников скольжения со смазкой конечным мерилем тепловой напряженности является температура масляного слоя, а тепловыделение зависит от ряда конструктивных параметров (длина контакта, диаметр) и коэффициента трения,

В качестве основных критериев выбора должны использоваться контактная прочность (несущая способность) и износостойкость. Задачи определения требуемых параметров теплостойкости, сопротивляемости агрессивным средам, оптимальной стоимости не представляют научных и технических проблем.

В результате создаются предпосылки реализации нового принципа проектирования – технологического обеспечения требуемых эксплуатационных показателей высокотехнологичных сборочных узлов и их надежности при одновременном проектировании технологии механической обработки с уточнением параметров сборки. Такой подход к этапам проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Такое проектирование актуально при любом типе производства и любой сложности технического проекта. Наибольший эффект, как показывает опыт внедрения автоматизированных подсистем, обеспечивается при непрерывной компьютерной поддержке основных этапов жизненного цикла (CALS-технологии) [1; 2].

что не учитывается приведенным критерием.

Предлагается для выбора материала вкладышей по характеристикам износостойкости и теплостойкости использовать единый критерий – минимальное значение работы трения (W_{\min}).

Работа трения определяется следующим выражением:

$$W = fPL,$$

где f – коэффициент трения; P – нагрузка; L – путь трения.

Если выразить нагрузку P через максимальное давление P_{\max} , а путь трения через скорость (v) и время (t) и учесть площадь контакта ($S_{\text{пл}}$), то

$$W = fP_{\max} S_{\text{пл}} vt,$$

где площадь контакта

$$S_{nl} = \frac{2\varphi_0}{360^\circ} 2\pi R_1 l = \frac{\pi\varphi_0}{90^\circ} R_1 l,$$

и тогда

$$W = \frac{\varphi_0}{45^\circ \sin \varphi_0} P v t f.$$

Полученный критерий учитывает практически все конструктивные, нагрузочные и временные параметры. Кроме того, время t работы узла может быть задано необходимое, поскольку отражает ресурс работы подшипника.

В соответствии с предложенной методикой созданы структурная схема и математическая модель автоматизированной подсистемы выбора материалов.

Процесс моделирования выбора материала деталей пар трения можно пред-

$$A = \{ \langle M_k, P_i, T_i, V_i \rangle \mid M_k \in M; P_i < P_B; T_i < T_B; V_i < V_B; \}, \quad (1)$$

где P_B, T_B, V_B – условия функционирования узла трения.

Дальнейшие шаги моделирования связаны с ранжированием допустимых альтернатив в соответствии с уровнем их предпочтительности в условиях конкретной задачи выбора. На предпочтительность того или иного материала, помимо условий обеспечения требуемых параметров работы узла (нагрузка, температура, скорость скольжения), может влиять целый ряд дополнительных условий (критериев), к которым обычно относят коррозионную стойкость, износостойкость, теплоустойчивость, предпочтительность по стоимости изготовления и обработки, прирабатываемость и др. При этом различные альтернативы удовлетворяют каждому из этих условий в разной степени, а увеличение предпочтительности по одному критерию часто ведет к ее уменьшению по другим. Таким образом, для построения процедуры синтеза оценок предпочтительности альтернатив необходимо привлечение методов многокритериального анализа решений, учитывающих данные условия и обладающих свойством устойчивости к неполноте и неопределенности исходной информации. Одним из таких методов является метод анализа иерархий, который и был применен в данной работе [3; 4].

ставить в виде последовательного выполнения нескольких этапов. Вначале для каждого материала выполняется процедура сравнения входной информации с множеством параметров, характеризующих допустимые значения свойств материалов, которые могут обеспечить функционирование узла трения в заданных условиях. В результате формируется начальное множество альтернатив, содержащее сочетание «материал – предельно допустимые значения», параметры которых удовлетворяют входным данным. Например, для параметров $\{P_i, T_i, V_i\}$ (P_i – допустимые значения нагрузки, T_i – температуры и V_i – скорости скольжения) входная информация представляется в следующем виде:

Оценивание альтернатив по критериям, имеющим числовое выражение, проводится по зависимости

$$C_i(x) = \frac{C_i(x)}{\sum_{x \in X} C_i(x)}.$$

На заключительном этапе осуществляется иерархический синтез, результатом которого является вектор обобщенных оценок предпочтительности альтернатив $x \in X$. Указанные оценки определяются в соответствии с правилом

$$C(x) = \sum_j \lambda_j C_j(x),$$

где параметр λ характеризует степень относительной важности детализирующих критериев по отношению к детализируемому.

Полученные значения $C(x)$ упорядочивают допустимые альтернативы по степени их предпочтительности в условиях поставленной задачи выбора оптимального материала. Таким образом, в качестве решения задачи можно рассматривать набор $\langle X, \{C(x) \mid x \in X\} \rangle$, где X – множество допустимых альтернатив, представленных в виде кортежа данных (1).

Понятие «модель трибосистемы» может быть определено как некоторая логико-математическая структура, имеющая систему переменных, соответствующих

элементам трибосистемы. Данные элементы трибосистемы могут быть классифицированы как её основные подсистемы: прочностная подсистема; динамическая подсистема; подсистема контактирования; подсистема трения и изнашивания; термодинамическая подсистема.

Для подсистемы контактирования первичной проблемой является формирование модели контакта соприкасающихся поверхностей. В понятие контактирования входит взаимодействие поверхностей, принадлежащих твердым телам, под действием относительного смещения и сжимающих сил с учетом их отклонения от идеальной формы и влияния среды (газы и смазочные материалы), присутствующей в зоне контакта.

Для решения задачи контактирования двух твердых тел необходимо представить модель поверхности, максимально приближенную к реальной и при этом имеющую минимальный набор входных пара-

метров. Построение пространственной модели производится на основе стержневых конечных элементов.

В качестве исходных параметров используются как стандартизованные параметры (среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии – R_a ; средний шаг неровностей профиля по средней линии – S_m (ГОСТ 2789-73)), так и нестандартные параметры волнистости (в продольном и поперечном направлениях: средняя арифметическая высота волны по средней линии – W_a , W_z ; шаг волны по средней линии – Sw_a , Sw_z).

Профиль волнистой поверхности моделируется синусоидой с амплитудой волны W_a (W_z) и шагом волны Sw_a (Sw_z). Профиль шероховатой поверхности также моделируется синусоидой. Окончательный профиль поверхности (рис. 1) получается сложением координат двух исходных синусоид.

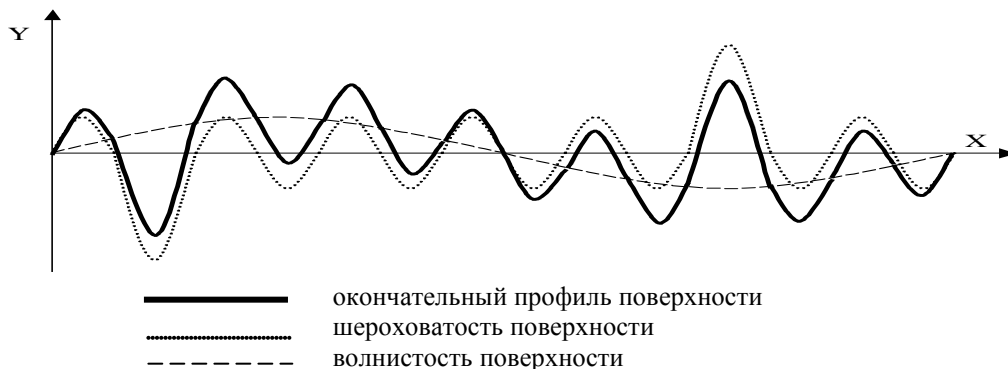


Рис. 1. Модель профиля поверхности

Общее уравнение профиля имеет следующий вид (для i -го конечного элемента):

$$Y_i = \Delta_i + A_{Ra_i} \sin(S_{Ra_i}) + A_{Wa_i} \sin(S_{Wa_i}),$$

где Δ - параметр, отражающий влияние радиального биения и других отклонений формы на профиль поверхности; A_{Ra_i} , A_{Wa_i} - значение амплитуды шероховатой и волнистой поверхности; S_{Ra_i} , S_{Wa_i} - шаг синусоиды шероховатого и волнистого профиля (изменяются для каждого полупериода по закону нормального распределения: $A_{Ra_i} = k_1 R_a$; $A_{Wa_i} = k_2 W_a$; $S_{Ra_i} = k_1 S_m$; $S_{Wa_i} = k_2 S_w$; где $k_{1,2i}$ - коэффициент, отра-

жающий вероятность нахождения параметра в заданных пределах).

Разбиение профиля на стержневые конечные элементы производится в зависимости от поверхностной твердости материала и требуемой точности расчета.

Пример окончательной поверхностной сетки твердого тела, получаемой в результате моделирования, представлен на рис. 2.

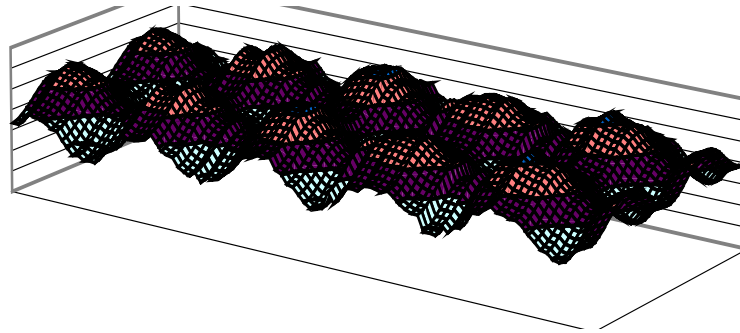


Рис. 2. Окончательный пространственный профиль поверхности

Контактные деформации будут происходить, если выполняется условие

$$\sigma \geq P_i,$$

где

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{y_n dy}{l};$$

$$P_i = \frac{P}{L dx n}.$$

Здесь E - модуль упругости; ε - относительное удлинение; y_n - число итераций контактных деформаций; l - толщина тела; P - общая нагрузка; L - длина контакта; dx - шаг разбиения; n - число элементов, вступивших в контакт.

Новая координата узла (вследствие контактных деформаций) определяется по следующей зависимости (применительно к нижней детали):

$$Y = Y_0 - y_n dy \frac{E_1}{E_1 + E_2},$$

где Y_0 - начальная координата узла; $E_{1,2}$ - модули упругости двух контртел соответственно.

Значение твердости элемента определяется в зависимости от величины деформации (с увеличением деформации - увеличивается) и температуры элемента (с увеличением температуры - уменьшается):

$$H_\mu = \exp\left(A - \frac{\alpha T}{T_{пл}}\right),$$

где A , α - коэффициенты, учитывающие степень деформации и градиент температуры элемента [1]; $T_{пл}$ - температура плавления.

Каждый составляющий конструкторский размер формируется в процессе изготовления деталей либо непосредственно при получении заготовки, либо при последующей обработке (чаще всего механической со снятием припусков). Для этого де-

тали определенным образом ориентируются относительно инструментов или неподвижных частей станков. При этом точность конструкторских размеров достигается различными технологическими методами: совмещением, постоянством или последовательной сменой баз [4; 5].

Для решения размерных цепей используются различные методики. На основе анализа исследований зарубежных и отечественных ученых для представленного исследования был выбран метод прямой линеаризации (Direct Linearization Method). Этот метод позволил описать сборку как цепь векторов.

В векторной форме уравнение размерной цепи в общем случае представляется в простейшем виде:

$$\vec{A}_\Delta = \sum_i^n \vec{A}_i \text{ и } \vec{T}_\Delta = \sum_i^n \vec{T}_i,$$

где n - количество составляющих размеров в цепи.

Если учитывать, что в пространственную размерную цепь могут входить не только линейные, но и угловые размеры, то общее векторное уравнение следует раскладывать и на линейные проекции, и на угловые.

В общем виде, используя матричную форму представления, это можно записать так:

$$\{T_\Delta\} = [A_{ji}] \{T\},$$

где $[A_{ji}]$ - матрица, содержащая частные производные, описанные выше; $\{T_\Delta\}$ - вектор-столбец, содержащий допуск замыкающего звена; $\{T\}$ - вектор-столбец, содержащий допуски составляющих размеров цепи.

В результате объединения размерных цепей с учетом формирования каждого ти-

па размеров могут быть назначены предельные отклонения исходных размеров

$$T_{\Delta} = \sum_i^n c_i T_{Si} + \sum_j^m c_j k_{\text{внут}j} k_{\text{внеш}j} k_{T_{\Delta}kj} + \sum_k^l c_k k_{\text{внут}k} k_{\text{внеш}k} k_{T_{\Delta}kk},$$

где c – коэффициенты передаточных отношений; T_S – допуски технологических размеров; $k_{\text{внут}}$, $k_{\text{внеш}}$, $k_{T_{\Delta}k}$ – коэффициенты, формирующие допуски эксплуатационных размеров, соответственно для внутренних и внешних факторов, точности расчетной схемы, используемой для определения параметров эксплуатационных свойств.

Значения дополнительных эксплуатационных звеньев являются функциями, которые определяются внешними и внутренними факторами. К внешним факторам можно отнести условия эксплуатации: величину и характер нагрузки, скоростные режимы, планируемую долговечность и др. К внутренним факторам – параметры, которые определяют эксплуатационные свойства сопряженных поверхностей: материал деталей, смазочные материалы, параметры качества поверхностного слоя и др.

Получены функции, описывающие дополнительные эксплуатационные звенья для разных типов сопряжений. Так, в плоском контакте сопряженных деталей и при наличии между ними небольших осциллирующих движений, например вследствие вибраций, происходит изнашивание. Взаимное внедрение поверхностей в результате изнашивания приводит к самоустановке деталей. При этом величины внедрения U_1 и U_2 и возможный перекося поверхностей можно описать уравнением плоскости в пространстве:

$$U_1 + U_2 = \beta_1 x + \beta_2 y + U_{\min},$$

где β_1 , β_2 – коэффициенты уравнения плоскости, соответствующие тангенсам углов наклона плоскости износа к соответствующим осям; U_{\min} – минимальное сближение в контакте.

Коэффициенты β_1 и β_2 и параметр U_{\min} для такой расчетной схемы можно определить как

$$\beta_1 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{ab^3}(b - 2l_{px});$$

[2; 4].

$$\beta_2 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{a^3b}(a - 2l_{py});$$

$$U_{\min} = \frac{P(k_1 + k_2)Vt}{a^2b^2}(6al_{px} + 6bl_{py} - 7ab)$$

где k_1 , k_2 – коэффициенты износа, характеризующие фрикционные свойства; P , V , t , l_{px} , l_{py} – параметры эксплуатации сопряжения; a , b – геометрия сопряжения.

Из полученных выражений выделяются параметры, характеризующие внешние факторы эксплуатационных размеров, $k_{\text{внеш}j}$. Аналогичным образом выделяются параметры, определяющие внутренние факторы, $k_{\text{внут}j}$. Далее относительно определенного единичного или комплексного параметра качества поверхностного слоя выполняется решение задачи.

Выделение из эксплуатационного допуска $k_{\text{внеш}j}$ и $k_{\text{внут}j}$ удобно при выполнении прямой задачи размерного анализа. Вместе с коэффициентами передаточных отношений эти новые коэффициенты позволяют сравнивать относительную значимость воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Другими словами, можно видеть, к каким поверхностям предъявляются более высокие требования (по точности – для обычных технологических звеньев и по параметрам качества поверхностного слоя – для эксплуатационных звеньев).

Также следует обратить внимание на вид эксплуатационных звеньев. Их можно разделить на звенья, имеющие условно постоянный размер, и звенья, имеющие условно переменный размер во времени. К первым относятся эксплуатационные размеры, связанные с деформациями контактирующих поверхностей, а ко вторым – с изнашиванием поверхностей. При этом переменный во времени размер является некоторой постоянной величиной для всего периода эксплуатации узла или машины. С другой стороны, вид эксплуатационных звеньев определяет значения их номиналов и допусков.

В настоящий момент на этапе технологической подготовки производства подбор технологических баз и перераспределение допусков между операционными размерами также выполняется. Однако

Заключение

Предложена концепция автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства, обеспечивающая определение конструктивных размеров и корректировку точности функциональных размеров отдельных деталей по критериям повышения технологичности конструкции при оптимизации простановки технологических размеров для различных вариантов реализации операций механической обработки. По критериям минимизации припуска и/или минимуму рабо-

предлагаемая концепция отличается от используемых в данный момент методов тем, что появляется возможность уже при конструировании узла определять и закладывать технологию изготовления.

чих ходов оптимизируется размерно-точностной анализ при различных схемах простановки операционных размеров.

Проведенный анализ позволил снизить объем слесарных доводочных работ более чем в три раза и обеспечить требуемую точность взаимного расположения отдельных элементов штампа, что оказало значительное влияние на оптимальное распределение нагрузки при эксплуатации и, как следствие, возможность достижения установленной долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерия поверхности деталей / кол. авт.; под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
2. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Научные технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 36-44.
3. Сулов, А.Г. От технологического обеспечения эксплуатационных свойств к качеству машин / А.Г. Сулов // Трение и износ. - 1997. - Т. 18. - № 3. - С. 311-320.
4. Сулов, А.Г. Научно-технологическая технология повыше-

ния качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Сулов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Научные технологии в машиностроении. - 2016. - № 5 (59). - С. 34-42.

5. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е.А. Польский // Научные технологии в машиностроении. - 2016. - № 10 (64). - С. 39-48.

1. *Parts Surface Engineering* / authors' group; under the editorship of A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2008. - pp. 320.
2. Polsky, E.A. Technological support of assembly unit quality based on dimension ties analysis taking into account operation / E.A. Polsky, D.M. Filkin // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2014. - No.11 (41). - pp. 36-44.
3. Suslov, A.G. From technological support of operation properties to machine quality / A.G. Suslov // *Friction and Wear*. - 1997. - Vol.18. - No.3. - pp. 311-320.
4. Suslov, A.G. Science intensive technology for as-

sembly unit quality increase in machines at stages of life cycle / A.G. Suslov, O.N. Fedonin, E.A. Polsky // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2016. - No.5 (59). - pp. 34-42.

5. Polsky, E.A. Technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at designing route-operation technological process by method of synthesis based on dimension ties analysis / E.A. Polsky // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2016. - No.10 (64). - pp. 39-48.

Статья поступила в редакцию 11.12.18

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Хандожко А.В.

Статья принята к публикации 22.03.19.

Сведения об авторах:

Польский Евгений Александрович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: polski.eugene@hotmail.com.

Polsky Evgeny Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof of the Dep. "Engineering Technique", Bryansk State Technical University, e-mail: polski.eugene@hotmail.com.

Сорокин Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: sorokin.tm@mail.ru.

Sorokin Sergey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof of the Dep. "Engineering Technique", Bryansk State Technical University, e-mail: sorokin.tm@mail.ru.