

## УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СХОЖДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ДВИЖЕНИИ. ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Приведены обоснованные критерии сопротивления усталости и чувствительности узла размещения тензометрических датчиков боковой реакции дороги в составе системы непрерывного регулирования схождения управляемых колес автотранспортного средства в процессе движения; разработанный метод выбора оптимальной конструкции датчикового узла, включающий моделирование и оценку напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, а также результаты его применения.

**Ключевые слова:** автотранспортное средство; схождение управляемых колес; система регулирования; датчик; напряженно-деформированное состояние.

Данная статья продолжает цикл публикаций, посвященных проблеме ресурсосбережения автомобильных шин за счет регулирования схождения управляемых колес автотранспортных средств (АТС) в процессе движения.

В предыдущей статье [1] приведены: устройство и принцип действия системы; выражения, учитывающие инерционность элементов системы, использование которых при настройке системы позволяет повысить точность регулирования схождения.

С целью выбора оптимальной по критериям сопротивления усталости, чувствительности и технологичности конструкции датчикового узла подсистемы управления и определения оптимальных параметров расположения тензометрических датчиков боковой реакции дороги на управляемые колеса были проведены специальные расчетно-экспериментальные исследования.

Обоснованные критерии и разработанный алгоритм, включающий моделирование и оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции методом конечных элементов, в совокупности составляют метод выбора оптимальной конструкции датчикового узла. Под датчиковым узлом в работе понимается пара: элемент, на котором установлен тензометрический датчик, и сам тензометрический датчик.

Алгоритм реализации метода рассмотрим на примере варианта конструкции датчикового узла со втулкой с буртиками (рис. 1).

На основе данных о геометрических параметрах натурной конструкции ходовой части автомобиля с применением программного ком-

плекса решения инженерных задач и анализа сложных конструкций «ANSYS v. 11» была построена расчетная трехмерная твердотельная модель датчикового узла, представленная на рисунке 2.

Для построения конечно-элементной модели датчикового узла использовались пространственные конечные элементы второго порядка с размерами, не превышающими длину полу-волны синусоиды краевого эффекта. При этом учитывалась осевая симметрия датчикового узла относительно геометрической оси поворотного кулака  $OO'$  (рис. 2). Это позволило при сохранении точности анализа сократить число степеней свободы конструкции и, следовательно, продолжительность вычислений.

В качестве внешней нагрузки при анализе было принято осевое единичное давление

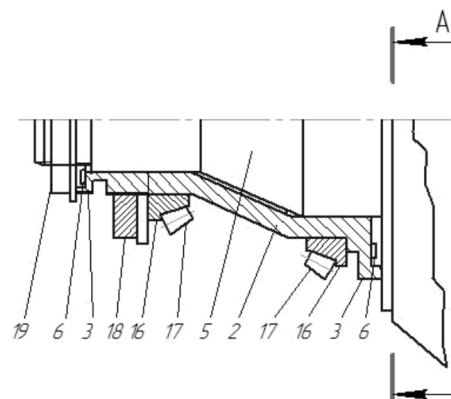


Рисунок 1. Ось управляемого колеса в сборе (вариант со втулкой с буртиками): 2 – втулка; 3 – буртик втулки; 5 – ось управляемого колеса; 6 – тензометрический датчик боковой реакции дороги на управляемое колесо; 16 – подшипник; 17 – тело качения подшипника; 18 – регулировочная гайка; 19 – гайка крепления втулки

$P = 1$  МПа внутреннего кольца подшипника ступицы на буртик втулки. Такой выбор обусловлен тем, что анализ вариантов конструкции датчикового узла проводился для одного типа узла ступицы колеса с неизменными геометрическими параметрами посадочных мест подшипников. Определить же фактическое давление подшипника на буртик втулки на данном этапе проектирования не представляется возможным. Преимущества этого подхода заключаются в: упрощении анализа, возможности сопоставления результатов расчетов для разных вариантов конструкции датчикового узла при равных значениях внешней нагрузки, возможности в последующем получить фактические

расчетные значения параметров НДС путем умножения результатов расчетов на величину фактической нагрузки (давления) на буртик, определенную экспериментальным путем.

Введение граничных условий (рис. 2) в расчетную конечно-элементную модель произведено на основе анализа условий работы и закрепления конструктивных элементов узла. Расчеты НДС проведены с учетом упругой модели деформирования материалов конструктивных элементов датчикового узла. Результаты расчета НДС представлены на рисунке 3 в виде расчетного распределения на конечно-элементной модели упругих эквивалентных напряжений  $\sigma$  по теории максимальных касательных напряжений.

Полученные расчетные значения эквивалентных напряжений использовались для оценки конструкции датчикового узла по критерию сопротивления усталости. При этом условно было принято, что максимальное эквивалентное напряжение ( $\sigma_{max} = 10,7$  МПа) соответствует максимальной амплитуде циклических напряжений. В этом случае конструкция, в которой возникают наименьшие значения  $\sigma_{max}$ , будет обладать наибольшей долговечностью, и наоборот. Кроме этого, полученное распределение эквивалентных напряжений наглядно показывает ту область, в которой возникают  $\sigma_{max}$  и которая лимитирует долговечность датчикового узла (МХ на рис. 3).

Для дальнейшего анализа в области предполагаемой наклейки тензометрических датчиков на поверхности втулки был выбран путь

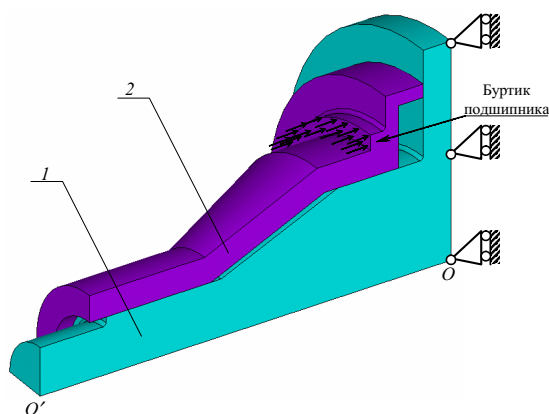


Рисунок 2. Расчетная модель и схема граничных условий для расчета НДС датчикового узла (вариант со втулкой с буртиками):

1 – ось управляемого колеса с поворотным кулаком; 2 – втулка с буртиками;  $OO'$  – ось симметрии;  $\rightarrow$  – осевое давление внутреннего кольца подшипника на буртик втулки

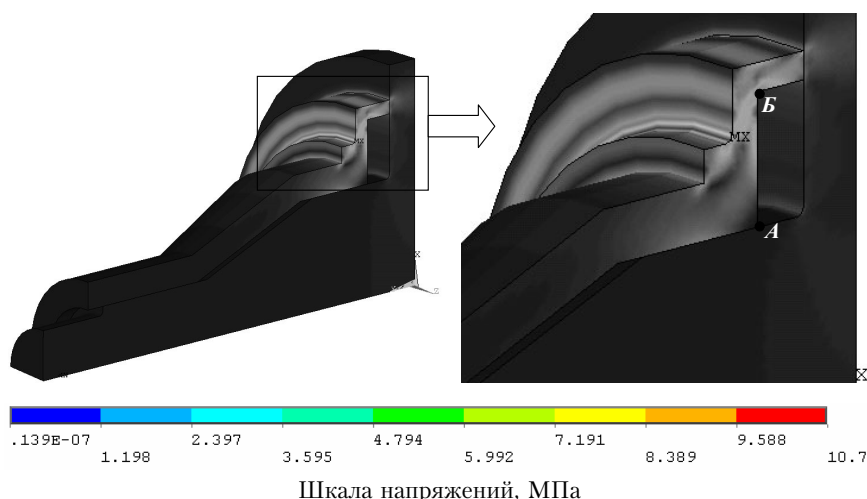


Рисунок 3. Распределение упругих эквивалентных напряжений на поверхности и в сечениях конечно-элементной модели датчикового узла при единичном осевом давлении подшипника на буртик втулки: А и Б – граничные точки в сечении исследуемой поверхности втулки

А-Б (рис. 3). Поскольку тензодатчики в данном случае применяются для косвенного определения боковой реакции дороги на управляемые колеса по величине измеренных деформаций участка втулки, по линии А-Б были рассчитаны и представлены в виде графиков расчетные значения относительных деформаций  $\epsilon$  (рисунок 4). Для поиска оптимального направления наклейки тензодатчиков анализировались расчетные деформации вдоль линии А-Б, а также деформации на линии А-Б в окружном (тангенциальном) направлении, т. е. «вокруг» оси поворотного кулака ОО' (рис. 2).

Полученные графики расчетных деформаций по линии А-Б (рисунок 4) использовались для определения оптимальной области и направления наклейки тензодатчиков вдоль линии А-Б. Для этого с учетом основных принципов тензометрии были использованы следующие положения:

- для максимальной чувствительности тензодатчики должны быть размещены в области максимальных значений расчетных деформаций  $\epsilon_{max}$  по линии А-Б (см.  $\epsilon_{ABmax}$  и  $\epsilon_{tmax}$  на рис. 4);
- для снижения погрешности измерений градиент изменения деформаций на величине базы  $b$  тензодатчика должен быть минимальным.

Таким образом, для определения оптимальной области и направления наклейки тензодатчиков на участке А-Б в автоматизированном режиме с использованием ЭВМ с целью повышения достоверности расчетов и снижения трудоемкости анализа, решение задачи было сведено к определению расстояния от начала участка А до точки, в которой среднее линеаризованное значение производной  $\epsilon'(h)$  от деформаций  $\epsilon$  по длине участка  $h$  на базе тензодатчика, соответствующее градиенту изменения деформаций, равно нулю, т. е.  $\epsilon_b'(h) = 0$ .

Для этого сначала численными методами были определены зависимости производной деформаций  $\epsilon'(h)$  и построены графики их изменения по длине участка А-Б (рис. 5).

Затем были рассчитаны средние линеаризованные значения производной на базе тензодатчика  $b - \epsilon_b'(h)$  по формуле:

$$\epsilon_b'(h) = \frac{\int_{\left(\frac{h-b}{2}\right)}^{\left(\frac{h+b}{2}\right)} \epsilon'(h) dh}{b}.$$

Расчетные значения  $\epsilon_b'(h)$  по длине участка А-Б представлены на рисунке 6. При этом за базу тензодатчиков была принята  $b = 5$  мм. С использованием результатов расчетов  $\epsilon_b'(h)$  из условия  $\epsilon_b'(h) = 0$  были определены оптимальные расстояния от начала участка А до места наклейки тензодатчиков вдоль линии А-Б ( $L_{дАБ}$ ) и в окружном (тангенциальном) направлении ( $L_{де}$ ) (рис. 6).

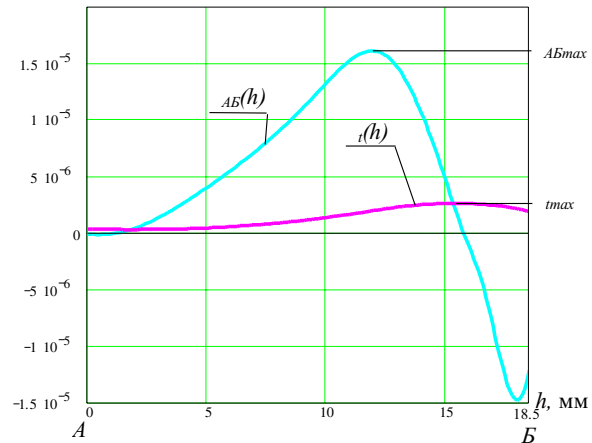


Рисунок 4. Расчетные значения относительных деформаций  $\epsilon$  на поверхности втулки датчикового узла: А, Б – границы участка наклейки тензодатчиков;  $h$  – протяженность участка;  $\epsilon_{AB}(h)$  – деформации вдоль линии А-Б;  $\epsilon_t'(h)$  – деформации на линии А-Б в окружном (тангенциальном) направлении;  $\epsilon_{ABmax}$  и  $\epsilon_{tmax}$  – максимальные деформации соответственно вдоль линии А-Б и в тангенциальном направлении

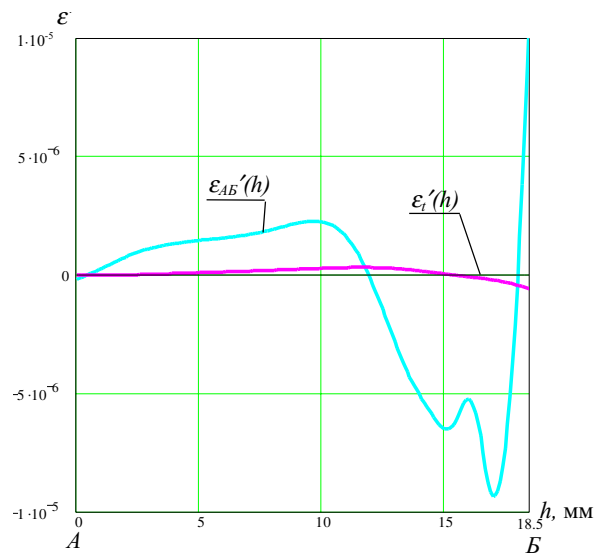


Рисунок 5. Графики изменения производной деформаций  $\epsilon'(h)$  по длине участка А-Б:  $\epsilon_{AB}'(h)$  и  $\epsilon_t'(h)$  – производные деформации соответственно вдоль линии А-Б и в окружном (тангенциальном) направлении

Для автоматизации выполнения вычислений оценочных показателей  $\epsilon_{AB\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$ ,  $L_{ДАБ}$  и  $L_{Дт}$  с применением численных методов и повышения, таким образом, достоверности расчетов и снижения их трудоемкости был составлен специальный алгоритм. Для этого расчетные значения деформаций из программы конечно-элементного анализа «ANSYS» через промежуточ-

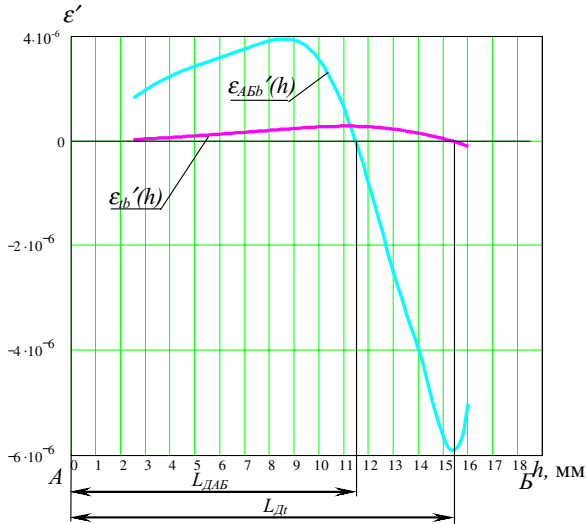


Рисунок 6. Графики изменения средней линейаризованной производной деформаций на базе тензодатчика  $\epsilon'(h)$  по длине участка А-Б:  $\epsilon'_{АБ}(h)$  и  $\epsilon'_{б}(h)$  – средние линейаризованные производные деформации соответственно вдоль линии А-Б и в окружном (тангенциальном) направлении;  $L_{ДАБ}$  и  $L_{Дт}$  – оптимальные расстояния соответственно от начала участка А до места наклейки тензодатчиков вдоль линии А-Б и в окружном (тангенциальном) направлении

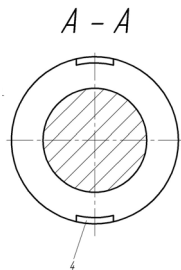


Рисунок 7. Сечение А-А оси управляемого колеса в сборе (вариант с выступами на фланцах втулок): 4 – выступ фланца втулки

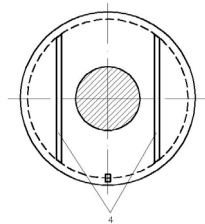


Рисунок 8. Кольца с параллельными прорезями (4)

ный файл экспортировались в программу математического анализа MathCad. В программе MathCad был составлен и реализован алгоритм автоматизированного вычисления искомым величин с использованием встроенных функций дифференциального и интегрального анализа.

Расчеты были проведены для одиннадцати вариантов конструктивного исполнения датчикового узла: а) со втулкой с буртиками (рис. 1); б) с конусными шайбами; в) с кольцами; г) со скосами и канавкой; д) со срезами и выступами; е) с буртиками втулок, разделенными на сектора; ж) с выступами на буртиках втулок; з) с выступами на фланцах втулок (рис. 7); и) с Г-образными рычажками на буртиках втулок; к) с параллельными прорезями в кольцах (рис. 8); л) с разрезами в кольцах.

На рисунках 9 и 10 представлены примеры результатов расчетов для этих вариантов в виде распределения расчетных эквивалентных деформаций (слева), а также графики изменения расчетных деформаций на поверхности исследуемых областей наклейки тензодатчиков (справа).

Результаты расчетов оценочных показателей, выбора оптимальной конструкции датчикового узла и определения оптимальной области и направления наклейки тензометрических датчиков представлены в таблице 1.

Для выбора оптимальной конструкции датчикового узла по критерию максимальной чувствительности обоснованы уровни чувствительности – высокий, средний и низкий. Высокому уровню чувствительности соответствуют абсолютные (по модулю) расчетные деформации на уровне  $\epsilon \geq 10^{-4}$ , среднему уровню –  $10^{-4} > \epsilon \geq 10^{-5}$ , низкому уровню –  $\epsilon < 10^{-5}$ . Результаты оценки уровней чувствительности для различных вариантов конструкции датчикового узла также представлены в таблице 1.

Анализ результатов выполненных расчетов позволяет сделать выводы:

- оптимальной конструкцией датчикового узла по критерию максимальной долговечности (по значениям максимального размаха напряжений) является вариант датчикового узла со втулкой и буртиками (рис. 1);

- оптимальными конструкциями датчикового узла по критерию максимальной чувствительности к изменению осевого усилия на управляемом колесе являются варианты конструкции датчикового узла с выступами на флан-

Таблица 1. Результаты расчетов показателей выбора конструкции датчикового узла и определения оптимальной локализации тензодатчиков боковой реакции дороги на управляемые колеса

Вариант	Условная максимальная амплитуда напряжений, $\sigma_{max}$ , МПа	Исследуемый участок	Направление вдоль участка			Тангенциальное направление		
			Размещение тензодатчика по отношению к точке А, $L_{дАБ}$ , мм	Максимальные деформации, $\epsilon_{Бmax}$	Уровень чувствительности	Размещение тензодатчика по отношению к точке А, $L_{дт}$ , мм	Максимальные деформации, $\epsilon_{tmax}$	Уровень чувствительности
а	10,8	А-Б	11,5	$1,6 \cdot 10^{-5}$	средний	15,5	$2,6 \cdot 10^{-6}$	низкий
б	124,8	А-Б	6	$9,1 \cdot 10^{-6}$	низкий	2,5	$3,4 \cdot 10^{-5}$	средний
в	61,9	А-Б	5,5	$5,3 \cdot 10^{-5}$	средний	10	$-9,4 \cdot 10^{-5}$	средний
		А-Б	10	$-4,4 \cdot 10^{-5}$	средний	2,5	$7,1 \cdot 10^{-5}$	средний
г	22,8	А-Б	4	$1,3 \cdot 10^{-5}$	средний	7,7	$-8,1 \cdot 10^{-6}$	низкий
		А-Б	8	$4,2 \cdot 10^{-5}$	средний	14	$5,8 \cdot 10^{-6}$	низкий
д	52	А-Б	12	$7,6 \cdot 10^{-5}$	средний	16	$2 \cdot 10^{-5}$	средний
е	18	А-Б	12,4	$2,8 \cdot 10^{-5}$	средний	12,8	$5,5 \cdot 10^{-6}$	низкий
ж	23	А-Б	11	$2,8 \cdot 10^{-5}$	средний	16	$5,6 \cdot 10^{-6}$	низкий
з	<b>70 (9)</b>	<b>А-Б</b>	<b>12,3</b>	<b><math>1,2 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>высокий</b>	<b>16</b>	<b><math>2 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b>средний</b>
и	40	А-Б	11	$4,7 \cdot 10^{-5}$	средний	7	$-3 \cdot 10^{-6}$	низкий
к	<b>110</b>	<b>А-Б</b>	<b>19</b>	<b><math>-1,5 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>высокий</b>	<b>2,5</b>	<b><math>9 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b>средний</b>
л	31,8	А-Б	5,5	$5,4 \cdot 10^{-5}$	средний	10	$-1,7 \cdot 10^{-5}$	средний
		А-Б	10,5	$-4,5 \cdot 10^{-5}$	средний	2,5	$2,1 \cdot 10^{-5}$	средний
		А-Б	2,5	$-2,1 \cdot 10^{-5}$	средний	2,5	$-1,4 \cdot 10^{-5}$	средний

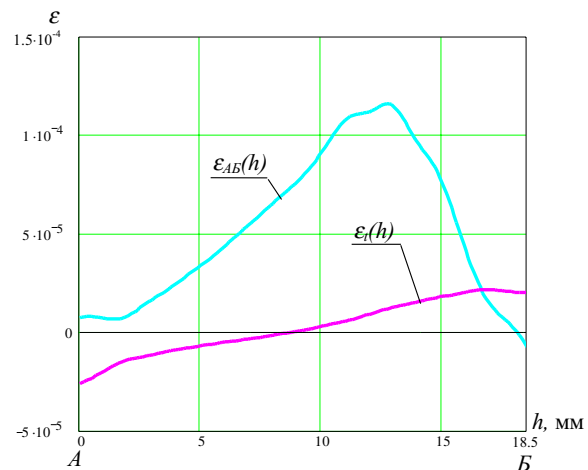
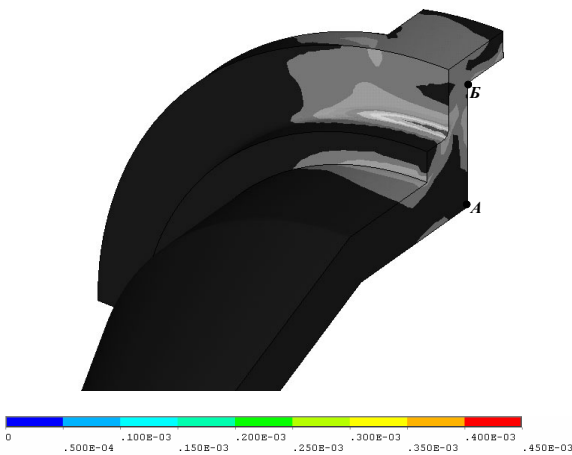


Рисунок 9. Результаты расчетов для варианта датчикового узла с выступами на фланцах втулок (рис. 7)

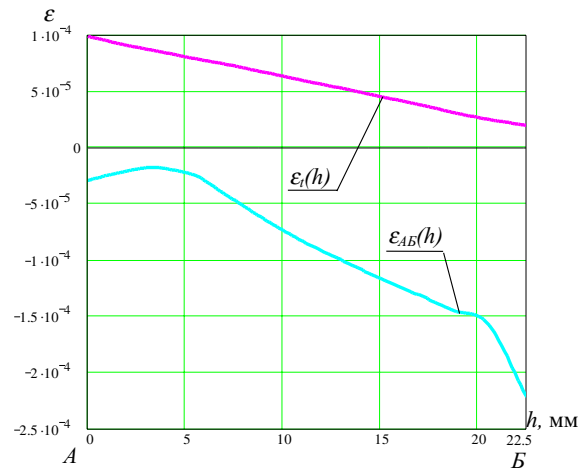
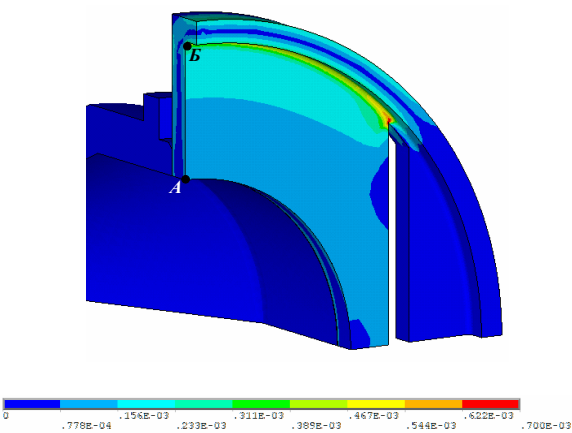


Рисунок 10. Результаты расчетов для варианта датчикового узла с параллельными прорезями в кольцах (рис. 8)

цах втулок (рис. 7) и с параллельными прорезями в кольцах (рис. 8);

– для варианта конструкции датчикового узла с выступами на фланцах втулок (рис. 8) путем конструктивной доводки и увеличения радиуса галтели до 2 мм в области конструкции с максимальными напряжениями и деформациями были получены значения условной максимальной амплитуды напряжений – 9 МПа, т. е. ниже предыдущих (табл. 1; см. значения в скобках), что соответствует максимальной долговечности рассматриваемых вариантов;

– для варианта конструкции датчикового узла с параллельными прорезями в кольцах (рис. 9) снизить значения условной максимальной амплитуды напряжений путем конструктивной доводки не удается;

– таким образом, оптимальной конструкцией датчикового узла является вариант с выступами на фланцах втулок (рис. 8); оптимальным размещением тензодатчика с базой  $b = 5$  мм является его размещение вдоль участка А-Б на втулке на расстоянии 12,3 мм от точки А.

21.06.2010 г.

**Список использованной литературы:**

1. Исайчев В.Т. Улучшение эксплуатационных характеристик системы непрерывного регулирования схождения управляемых колес автотранспортных средств в движении (Часть 1. Повышение точности регулирования) / В.Т. Исайчев, В.И. Рассоха // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – №10. – С. 141–143.

Сведения об авторе: **Рассоха Владимир Иванович**, заведующий кафедрой автомобилей и безопасности движения Оренбургского государственного университета, канд. техн. наук, доцент 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ГОУ ОГУ, кафедра АиБД, тел. (3532) 754182, email: trf@mail.osu.ru

**UDC 629.1.02:629.11.012.5**

**Rassokha V.I.**

**IMPROVING THE PERFORMANCE OF CONTINUOUS CONTROL CONVERGENCE STEERING WHEEL SYSTEM FOR MOTOR VEHICLES IN MOTION. INCREASING THE SENSITIVITY OF MANAGEMENT SUBSYSTEM**

The report provides reasonable criteria of fatigue resistance and sensitivity of the site placement of strain gage side reaction of the road as part of a system of continuous control of convergence of the steered wheels of the vehicle in motion; developed method for selecting the optimal design of sensor site, including the modeling and evaluation of the stress-strain state through the method of finite elements and the results of its application.

Keywords: vehicle; toe steering wheel, the system of regulation; sensor; stress-strain state.

**Bibliography:**

1. Isaichev, V.T. Improvement of operating characteristics of system for continuous regulation of convergence wheels of vehicle at movement (Part 1. Increase of regulation exactness) / V.T. Isaichev, V.I. Rassokha // VESTNIK of Orenburg State University. – 2010. – №10. – P. 141–143.