

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРТАТИВНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ЖЕСТКОСТИ ЕГО КОНСТРУКЦИИ В СРЕДЕ САПР PRO/ENGINEER

Фёдоров Р.В.¹, Фуфаев А.В.², Болотин А.А.³

¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

² НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», г. Минск, Республика Беларусь

³ ОАО «Пеленг», г. Минск, Республика Беларусь

В САПР Pro/ENGINEER построена 3D-модель портативного прибора наблюдения. посредством встроенного в данный пакет модуля инженерного анализа проведен механический анализ жесткости конструкции изделия. Определены собственные частотные колебания прибора по ортогональным осям и соответствующие точки максимальной концентрации напряжений в оптических и механических компонентах под действием их силы тяжести. (E-mail: feod@tut.by)

Ключевые слова: прибор наблюдения, метод конечных элементов, инерциальная нагрузка, частотное колебание, эквивалентное напряжение.

Введение

Развитие оптического приборостроения привело к появлению на мировом рынке большого числа портативных комбинированных устройств наблюдения. Данные изделия сочетают в себе достоинства тепловизионного прибора и телевизионной камеры, а с конструктивной точки зрения позволяют устранить недостатки каждой из отдельно взятых оптических систем.

Анализ основных технических и эксплуатационных характеристик существующих многоканальных комплексов и систем наблюдения показал, что улучшение параметров функциональных каналов непосредственно связано с возрастанием массы прибора и его габаритных размеров (таблица 1) [1–3].

Возрастание численных значений указанных технических параметров приводит к появлению проблем связанных с эргономическими показателями конструкции изделия. В частности, большие габаритные размеры изделия приводят к ограничениям доступа к органам управления прибора, а также продолжительности его удержания в руках пользователя.

Указанные причины приводят к появлению утомляемости пользователя и непреднамеренному дрожанию изображения при наблюдении.

Согласно ГОСТ 26170-84 рекомендуемая максимально допустимая масса портативного прибора не должна превышать 6 кг.

Научная задача исследований заключалась в изучении направлений возможной миниатюризации конструкции прибора наблюдения (ПН) за счет оптимальной внутренней компоновки его составных узлов, равномерного распределения нагрузки по всему корпусу изделия и обеспечения при этом максимальной функциональности, связанной с дальностью обнаружения и распознавания цели.

Объектом исследования в данной работе является малогабаритный переносной оптико-электронный ПН с тремя основными встроенными каналами: телевизионный низкоуровневый канал на фотоприемной матрице; тепловизионный канал спектрального диапазона 8–12 мкм на неохлаждаемой микроболометрической матрице и дальномерный канал на базе полупроводникового лазера с рабочей длиной волны 905 ± 20 нм.

К основным функциональным возможностям прибора относятся:

– визуальное обнаружение и распознавание наземных целей типа «человек, машина на колесном или гусеничном ходу» в дневное и ночное время, а также в условиях плохой видимости и быстро меняющейся освещенности;

Таблица 1

Основные характеристики различных моделей систем наблюдения

Параметр системы наблюдения	Наименование модели прибора, производитель, страна		
	«КАПОНИР» (НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО) РБ	«MARS» (Elbit Systems Ltd.) Israel	«Бумеранг-Буревестник» (ОАО «РОМЗ») РФ
Дальность распознавания цели (тепловизионный канал), м	1000	500	1500
Разрешение тепловизионной матрицы, пикс	640 × 480	384 × 288	Нет данных
Дальность распознавания цели (телевизионный канал), м	1000	Нет данных	3000
Диапазон измерения дальности, м	50–2000	50–2000	100–5000
Размеры (длина, ширина, высота), мм	264 × 225 × 159	200 × 180 × 90	Нет данных
Масса, кг	6,1	2	15

– измерение дальности до целей в пределах от 50 до 2000 м с погрешностью не более ± 2 м в импульсном режиме (не более 0,5 с);

– измерение угла места и азимута целей с точностью не менее 0,5°;

– определение собственного местоположения прибора наблюдения по широте и долготы с точностью не менее 0,001° (с привязкой к глобальной спутниковой навигационной системе координат GPS/GLANASS);

– подготовка и передача полученной информации на внешние устройства по интерфейсу RS-232 или USB для снятия показаний об объекте наблюдения.

Конструктивно изделие снабжено автономным источником питания, имеет посадочное место крепления для установки на штатив-треногу, а также удобное расположение кнопок управления при удерживании прибора в руках.

ПН должен сохранять работоспособность в достаточно сложных условиях эксплуатации: при пониженном атмосферном давлении, воздействии солнечного излучения, атмосферных конденсированных осадков, пыли, морского тумана, паров масла, различных видов топлива (таблица 2).

Улучшение прочностных характеристик конструкции ПН возможно за счет компьютерного моделирования воздействия на него различных знакопеременных динамических нагрузок.

Таблица 2

Внешние условия работы прибора

Наименование параметра	Численное значение
Температура окружающей среды, °С	от -40° до +60°
Максимальная влажность воздуха, %	98 % (не более 48 ч)
Воздействие вибрации в диапазоне частот, Гц	от 20 до 80
Амплитуда ускорения при воздействии синусоидальной вибрации, м/с ²	40 м/с ² (4 g)

Средства для создания 3D-модели и назначение основных узлов прибора

Трехмерная геометрическая модель изделия создана в лицензионной среде САПР Pro/ENGINEER (рисунок 1).

На стадии выполнения технического проекта был разработан действующий макетный образец ПН с габаритными размерами 250 × 188,8 × 116,5 мм и массой 3,7 кг.

Проведенные предварительные лабораторные испытания макетного образца показали, что выбранная элементная база ПН не обеспечивает в полной мере требования по дальности распознавания цели тепловизионным и телевизионным каналами (таблица 3).

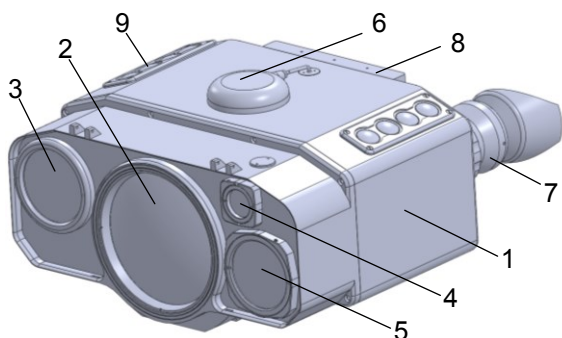


Рисунок 1 – 3D-модель прибора наблюдения:

1 – корпус; 2 – объектив тепловизионного канала; 3 – объектив телевизионного канала; 4 и 5 – объективы соответственно передающего и приемного дальномерного канала; 6 – внешняя активная антенна ГЛОНАСС/GPS; 7 – окуляр с маломощным AMOLED микродисплеем для отображения видеoinформации; 8 – батарейный отсек; 9 – встроенный блок управления

Таблица 3

Сравнительные характеристики макетного и опытного образцов

Наименование параметра	Макетный образец	Опытный образец
<i>Телевизионный канал</i>		
Диапазон рабочей освещенности, лк	$5 \cdot 10^{-2} - 10^4$	$6 \cdot 10^{-5} - 10^4$
Диапазон изменения углового поля зрения, °	2,3–20	1,7–26
Дальность распознавания цели*, м	до 800	до 1000
<i>Тепловизионный канал</i>		
Диапазон рабочих длин волн, мкм	10–12	8–12
Поле зрения, ° (горизонт × вертикаль)	5 × 4	6,2 × 5
Дальность обнаружения цели типа «человек», м	1400	2000
Дальность распознавания цели типа «человек», м	650	1000
<i>Дальномерный канал</i>		
Рабочая длина волны, нм	905–20	
Диапазон измерения дальности**, м	$50 \pm 2 \div 2000 \pm 2$	
Расходимость лазерного излучения дальномера, рад	1,7	

* Тип цели – «человек в камуфляже» во всех условиях освещенности и метеорологической дальности видимости МДВ ≥ 10 км и на фоне местности с коэффициентом отражения $\leq 0,1$.

** Цели с угловым размером не менее 1,5 мрад, коэффициентом диффузного отражения $\geq 0,25$, в условиях МДВ ≥ 10 км.

Для достижения заданных технических параметров были проведены уточняющие оптический и энергетический расчеты, результаты которых показали необходимость применения покупных частей изделия с большими массогабаритными характеристиками. Повышение функциональных показателей ПН связано с рациональным выбором составной элементной базы изделия.

В результате проведенного сравнительного анализа различных моделей в качестве приемника телевизионного канала была выбрана низкоуровневая высокочувствительная камера с ПЗС сенсором с глобальным затвором, что по сравнению с КМОП матрицами, работающими в режиме скроллинга-затвора, обеспечивает минимальное искажение геометрии движущихся объектов (рисунок 2).

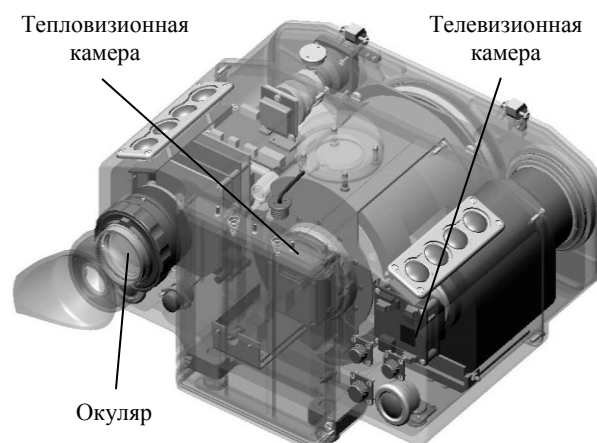


Рисунок 2 – Внутренняя компоновка прибора наблюдения с расположением основных электронных узлов

В камере используется комбинация двух режимов увеличения чувствительности: биннинга и интегрирования кадров. Благодаря специальному алгоритму переключения этих режимов в сочетании с применением «шахматного» биннинга, с одной стороны, повышена эффективность режимов увеличения чувствительности и, с другой стороны, значительно снижен уровень влияния артефактов. Наряду с высококачественным наблюдением в дневное время суток, чувст-

вительность камеры в ночное время приближается к чувствительности приборов ночного видения с ЭОП 2-го поколения.

В качестве тепловизионного канала в ПН используется неохлаждаемый длинноволновый тепловизор со спектральной областью чувствительности в диапазоне 8–12 мкм.

Дальномерный канал конструктивным изменениям не подвергался. Узел излучателя дальномерного канала построен на базе лазера с диодной накачкой мод. SPL-PL90-3, работающего в импульсном режиме ($\tau = 100$ нс).

Габаритные размеры AMOLED микродисплея, встроенного в окуляр, также не изменились (9×12 мм), однако увеличилось его разрешение с исходных 600×450 пикс. до

800×600 пикс., что позволило значительно улучшить наблюдаемое изображение на экране.

В результате конструирования получена компоновка ПН с габаритными размерами и массой составных частей, приведенными в таблице 4. Таким образом, общая масса опытного образца прибора дополнительно увеличилась и составила около 6 кг.

При оптимальном составе ПН по входящим компонентам снижение массы изделия становится возможным только за счет правильного подбора материала корпусных базовых деталей, без ущерба снижения жесткости конструкции прибора в целом.

В таблице 5 приведены свойства основных материалов используемых при изготовлении элементов конструкций прибора наблюдения.

Таблица 4

Масса и габаритные размеры составных частей опытного образца ПН

Составные части	Размеры, мм	Масса, кг
Корпус прибора	$264 \times 190 \times 145$	2,20
Телевизионный канал	$78 \times 65 \times 158$	0,63
Тепловизионный канал	$125 \times 125 \times 163$	1,34
Дальномерный канал (излучатель)	$32 \times 32 \times 78,5$	0,06
Дальномерный канал (приемник)	$62 \times 62 \times 101,4$	0,22
GPS антенна	$\varnothing 57 \times 15$	0,15
Окуляр с AMOLED микродисплеем	$22 \times 17 \times 4,6$	0,20
Батарейный отсек с батарейками (2 шт.)	$138 \times 120 \times 50$	0,71
Компас электронный	$50 \times 40 \times 13$	0,02
Блок управления	$70 \times 39 \times 8,5$	0,42

Таблица 5

Принятые значения параметров материалов

Наименование физико-механического параметра	Марка материала (компонент)		
	Алюминиевый сплав Д16Т ГОСТ 4784-97 (корпус прибора)	Сталь 45 ГОСТ 535-88 (некоторые крепежные элементы)	Стекло К8 ГОСТ 3514-94 (оптические детали)
Массовая плотность ρ , кг/м ³	2780	7826	2520
Модуль Юнга E, ГПа	73,0	204,0	–
Коэффициент Пуассона μ	0,33	0,3	–
Коэффициент линейного расширения, K ⁻¹	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	–
Удельная теплоемкость, Дж/ (кг·К) (при T = 20°)	960	473	–

Указанные численные значения физико-механических параметров необходимы для проведения прочностного компьютерного анализа конструкции изделия.

Метод прочностного компьютерного анализа изделия

Одним из наиболее оптимальных методов прочностного анализа конструкции 3-хмерной компьютерной модели прибора в настоящее время является метод конечных элементов (МКЭ).

В соответствии с этим методом поверхность всего изделия или отдельного его компонента автоматически задается сеткой из массива двумерных (треугольники и параллелограммы) или трехмерных (например, тетраэдры и параллелепипеды) геометрических фигур. Разбиение может быть неравномерным и априорно учитывать градиент фазовой переменной, т.е. там, где происходит быстрое изменение формы поверхности, сетка должна быть гуще и наоборот. При автоматическом наложении сетки на внешние поверхности ПН наибольшая плотность элементов наблюдалась на объективах телевизионного канала, приемного и передающего дальномерного канала; на окуляре, а также на гранях корпуса в местах перехода сопряженных поверхностей (рисунок 3).

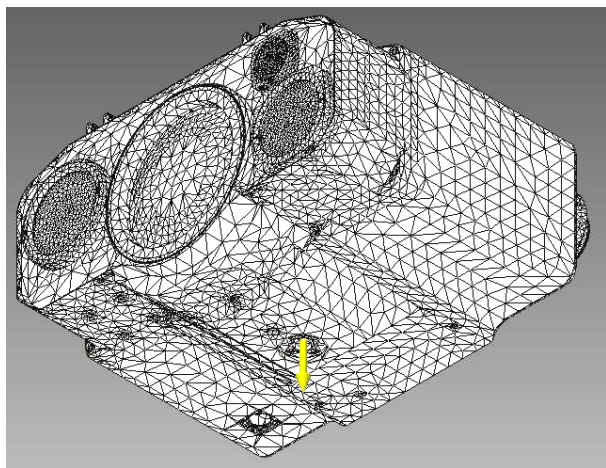


Рисунок 3 – Схема наложения сетки на 3D-модель прибора наблюдения

Взаимосвязи между тетрагональными 10-узловыми конечными элементами описываются специальными пробными функциями или глобальными базисными функциями, обладающими следующими свойствами – в узле аппрок-

симации (резкого перехода) функции имеют значение равное единице, в остальных случаях равны нулю.

В зависимости от соотношения требований точности решения задачи и возможностей вычислительной системы выбирают линейную, квадратичную или кубическую степень функции формы, при этом число узлов аппроксимации должно быть минимум на единицу больше порядка аппроксимирующей функции [4].

На основе полученных функций сформированы глобальные матрицы, отражающие зоны деформации тела под воздействием векторов синусоидальных нагрузок, а также определены частоты собственных колебаний ПН.

Конечно-элементная трехмерная компьютерная модель ПН создана в пакете Pro/ENGINEER. Прочностной анализ модели проводился посредством РС следующей конфигурации: тактовая частота процессора – $2,6 \times 2$ ГГц; ОЗУ (DDR3) – 4 Гб. Общее машинное время обсчета составило 10 мин 9 с, в том числе: наложение сетки из конечных элементов 3 мин 23 с, построение топограммы прибора для одной отдельно заданной формы колебания или деформации 51 с.

Целью проведенного прочностного анализа являлось определение величины поверхностных деформаций, внутренних напряжений и собственных частотных колебаний конструкции прибора при эквивалентном инерционном нагружении, а также оценка прочностного запаса.

Результаты расчета

Причина появления вибрации – неуравновешенное силовое воздействие. Основной процедурой механического анализа является модальный анализ, который предназначен для определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкции. Знание собственных частот необходимо при конструировании деталей и узлов, чтобы избежать их возбуждения на одной из собственных частот в процессе эксплуатации.

Согласно данным ГОСТ В 20.57.304-98 [5] для диапазона частот синусоидальной вибрации 20–80 Гц, амплитуда перемещения не должна превышать 10 мм. ПН относится к переносному классу приборов и в процессе эксплуатации находится в непосредственном контакте с человеком, что в свою очередь накладывает огра-

ничения на его рабочий частотный диапазон. С гигиенической точки зрения ГОСТ 12.1.003 для человека безопасными считаются частоты в диапазоне 20–20000 Гц, имеющие слабую силовую интенсивность (дБ) [6].

Частота ниже порогового значения 20 Гц относится к инфразвуку и образуется вследствие работы компрессоров, дизельных двигателей, вентиляторов, реактивных двигателей, транспортных средств и др. При длительном воздействии инфразвук оказывает негативное влияние на органы слуха, вызывая утомление, чувство страха, головные боли и головокружение, а также снижает остроту зрения. В нашем случае низкочастотные колебания могут возникать в результате передвижения оператора с прибором на транспортном средстве. Верхний частотный диапазон 80 Гц определяется антропометрическими свойствами (физиологическими особенностями человеческого тела), а именно частотный диапазон сокращения мышц рук оператора находится в диапазоне 30–80 Гц.

Определение величины деформации программным методом осуществляется в автоматическом режиме. Назначается номер моды, для которой соответствует свой частотный диапазон, и определяется значение деформации. Топограмма распределения деформации строится только при их наличии. Если на заданном диапазоне частот деформация отсутствует, то программа выбирает более высокую частоту и повторяет анализ, до появления первой резонансной частоты.

Анализ работы программы показал, что в диапазоне частот 20–80 Гц деформации отсутствуют. Первая величина деформации 19,01 мм проявляется только на частоте 116 Гц и сконцентрирована не на наружной поверхности корпуса ПН, а внутри его на верхней кромке корпуса телевизионного канала в месте крепления платы его управления (рисунок 4).

С эксплуатационной точки зрения в частотном диапазоне 110–120 Гц практически отсутствуют биологические и техногенные источники возмущения высокой мощности, способные привести ПН к каким-либо полным или частичным разрушающим колебаниям (наиболее близкий источник – высота голоса взрослого мужчины 80–200 Гц, однако его мощность не превышает 40–70 дБ).

Усовершенствование конструкции макетного образца до опытного образца по электронной базе используемых компонентов, также

способствовали уменьшению собственных резонансных частот ПН.

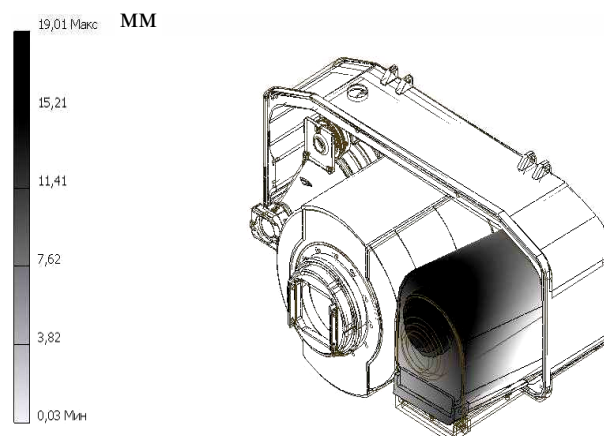


Рисунок 4 – Распределение деформации по поверхности ПН (вид со стороны окуляра без внешнего корпуса)

Результаты лабораторных и полевых испытаний опытного образца

Лабораторные испытания опытного образца проводились в три этапа в соответствии с разработанной на предприятии программой и методикой предварительных испытаний на основании технических требований изложенных в ГОСТ В 20.57.305-98 [7].

Основная цель указанных испытаний заключалась в оценке эффективности работы амортизаторов, элементов крепления корпуса с другими разъемными элементами конструкции и составными частями ПН.

1. В ходе проведения испытаний осуществлялась проверка прочности ПН к ударному воздействию при его однократном свободном падении с высоты 1 м на бетонную площадку толщиной не менее 100 мм, на которой разложена прокладка из войлока марки ТПР15 толщиной 15 мм по ГОСТ 288. При этом проводилась предварительная подготовка испытательной площадки согласно следующим требованиям: ее поверхность должна быть ровной, твердой и жесткой. Ограничительным фактором при испытании являлось исключение падения ПН непосредственно на оптические детали.

2. Далее осуществлялась проверка ПН на возможность сохранения работоспособности после воздействия на него синусоидальной вибрации в диапазоне частот 20–80 Гц с амплитудой ускорения 39,2 м/с² (4g). С этой целью ПН жестко закрепляли на вибрационной электроди-

намической установке мод. ВЭДС-1500 (LDS, Англия) в эксплуатационном положении и испытывали по нормам, указанным в таблице 6.

Программа и методика испытаний предусматривала следующие действия.

При включении вибростенда плавно изменяли частоты в заданном диапазоне в направлении от нижней частоты до верхней и обратно со скоростью не более одной октавы в минуту. При этом стремились поддерживать заданную в таблице амплитуду виброперемещения и виброускорения. Контрольные значения ускорения и амплитуды виброперемещения измеряли в точках крепления ПН.

Таблица 6

Нормы проверок на вибропрочность

Поддиапазон частот, Гц	Амплитуда виброперемещения, мм	Амплитуда виброускорения, m/c^2 , (g)
16–20	0,5	—
20–25	0,5	—
25–31,5	0,5	—
31,5–40	0,5	—
40–50	—	39,2 (4)
50–63	—	39,2 (4)
63–80	—	39,2 (4)
80–100	—	39,2 (4)
100–120	—	39,2 (4)

3. Проверку устойчивости изделия в упакованном виде к разрушающему действию механических нагрузок, возникающих при транспортировании, производили следующим образом.

Перед испытанием проверили надежность крепления ПН в штатной упаковке для транспортирования. ПН в упаковке жестко закрепляли в центре платформы стенда ST-500.

Испытания проводили с частотой повторения 40–120 ударов в минуту, при пиковом ускорении 20g и длительности ударных импульсов 1–5 мс, число ударов составляло 2000. Измерение пиковых ударных ускорений осуществлялось с погрешностью не более $\pm 15\%$.

Далее изделие снимали со стенда и проводили внешний осмотр тары, а также осуществ-

ляли проверку чистоты оптических деталей и внешний осмотр на отсутствие механических повреждений и качество маркировки.

Перед началом и по окончании всех видов испытаний ПН проверяли на соответствие всем пунктам технических характеристик.

Заключение

1. При сохранении внешних габаритных размеров изделия, увеличение массы прибора наблюдения по составным частям способствует дополнительному гашению амплитудных вибраций и смещению точки резонанса в верхний частотный диапазон.

2. В ходе анализа результатов моделирования в частотном диапазоне эксплуатации прибора (20–80 Гц) расчетная величина деформаций не наблюдается. Первичные резонансные колебания определяются на частоте 116 Гц. Точка концентрации деформации расположена внутри прибора наблюдения на кромке корпуса телевизионного блока, что объясняется его значительной массой (0,63 кг).

3. Снижение массы изделия на 52 % за счет уменьшения толщины стенок корпуса прибора наблюдения с исходных 3–4 мм до 2 мм приводит к смещению точки возникновения резонанса с частоты 116 Гц на частоту 68,82 Гц, которая попадает в ограничительный диапазон вибраций и является недопустимой.

4. Результаты проведения лабораторных стендовых испытаний показали, что прибор наблюдения имеет 4-х кратный запас прочности конструкции к воздействию кратковременных знакопостоянных и однократных знакопеременных синусоидальных вибраций.

Список использованных источников

1. Соломонов, М. Точность и интеллектуальность на службе у «Солдата будущего» / М. Соломонов // Армия. – № 3. – 2012. – С. 20–23.
2. MARS. Uncooled Hand-Held Thermal Imager with Target Acquisition Capabilities. Thermal Imaging Systems. Elbit Systems Electro-optics. – Elop Ltd. № 8. – 2009. Israel. – www.elbitsystems.com/elop.
3. Модуль телетепловизионный дальномерный (МТТД) «Бумеранг-Буревестник» / ОАО Ростовский оптико-механический завод. Продукция. – <http://www.romz.ru/ru/catalog/>
4. Трудоношин, В.А. Метод конечных элементов : электронный учебник / В.А. Трудоношин,

- М.Ю. Уваров ; МГТУ имени Н.Э. Баумана. Кафедра САПР. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rk6.bmstu.ru/electronic_book/function_model/mke/mke.html.
5. ГОСТ РВ 20.57.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. ДСП. – Госстандарт России. Москва. – 55 с.
 6. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – Госстандарт России. Москва. – 14 с.
 7. ГОСТ РВ 20.57.305-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов. ДСП. – Госстандарт России. Москва. – 50 с.

Feodortsau R.V., Fufaev A.V., Bolotin A.A.

Modelling and optimization of portable supervision the device of by means of analysis of rigidity of its design in the environment of Pro/ENGINEER SAPR

The 3D model of the portable device of supervision using SAPR Pro/ENGINEER is constructed. By means of the module of the engineering analysis built in this package the mechanical analysis of rigidity of a product design is carried out. Own frequency fluctuations of a product by orthogonal axes and the corresponding points of the maximal tension concentration in optical and mechanical components under the influence of their gravity are determined. (E-mail: feod@tut.by)

Key words: supervision device, finite element method, inertia load, self frequency, equivalent stress.

Поступила в редакцию 05.03.2013.