СОЗДАНИЕ ЛИНЕЙКИ МОДУЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК, АДАПТИРУЕМЫХ ПОД РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ БПЛА.

Крылов Егор Дмитриевич
Рутковский Валерий Олегович

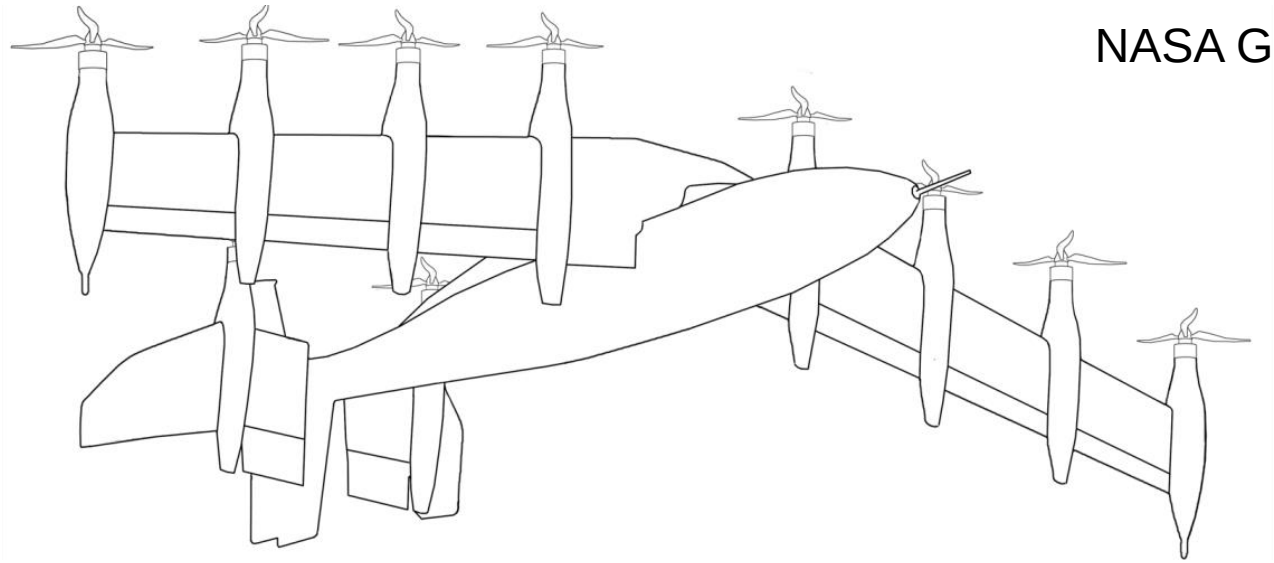
АВИАМЕХАНИКА
Научно-производственное предприятие

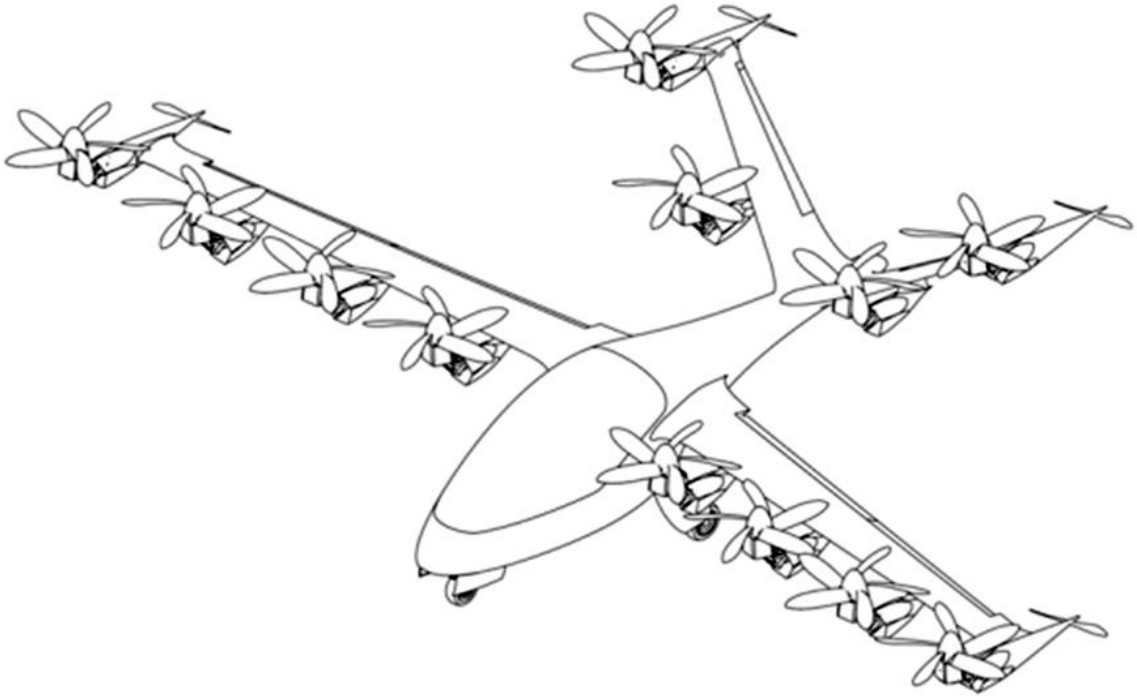
ПРОГНОЗГЕОФИЗИКА

Часть 1

ГИБРИДНЫЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

NASA GL-10



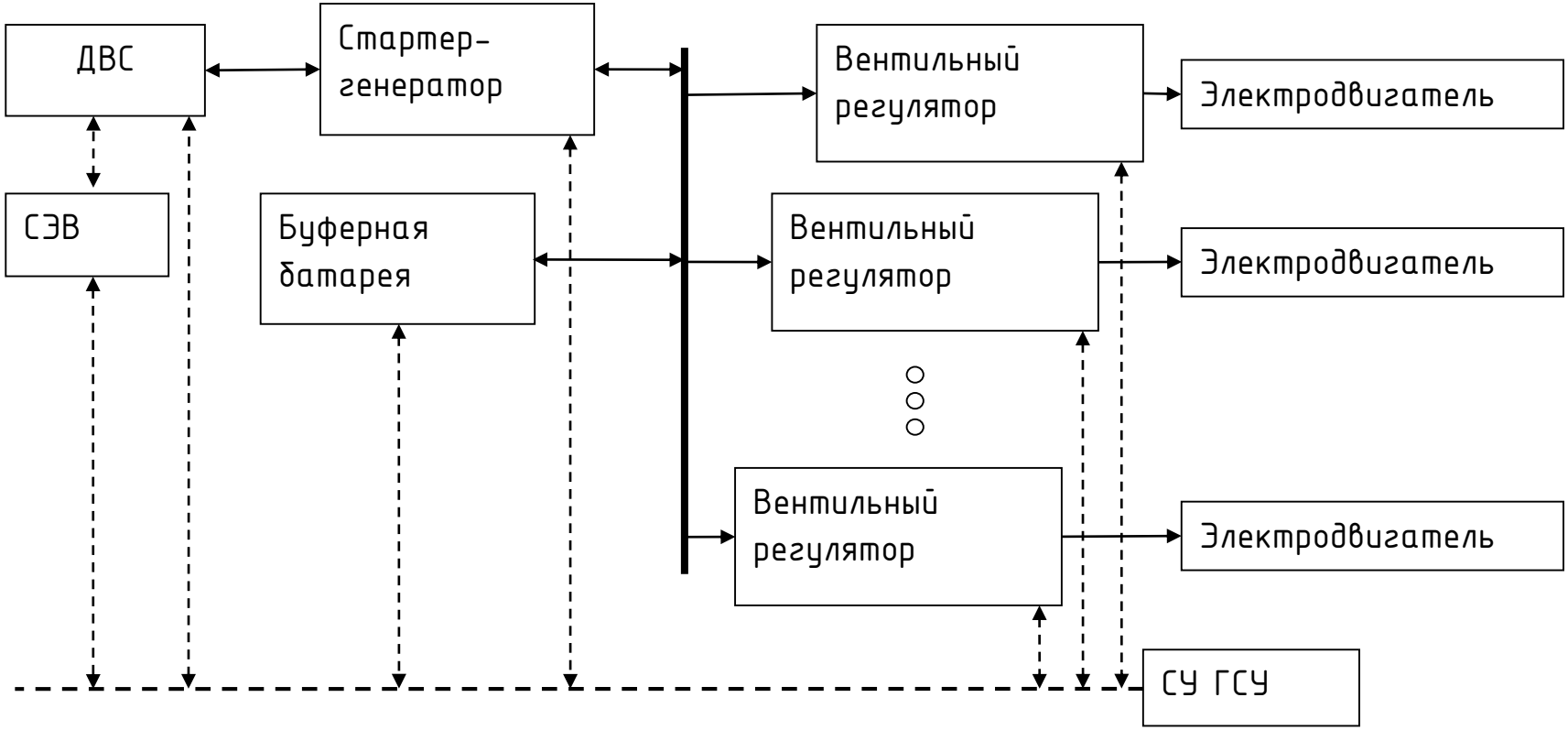


Joby S2

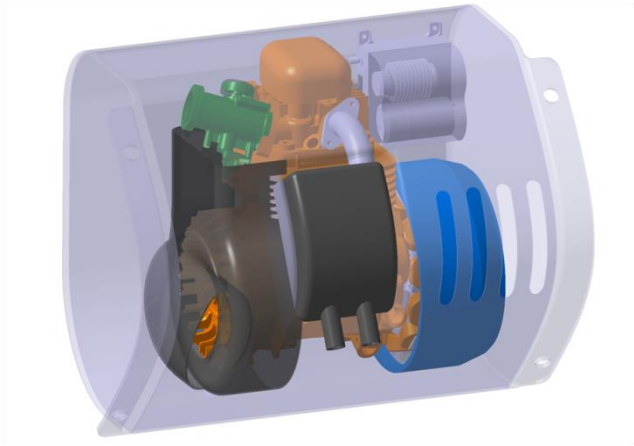
Проект предполагает создание:

Гибридной силовой установки (ГСУ) для обеспечения вертикального взлета, снижения взлетной массы, повышения эффективности, увеличения длительности и дальности полета ЛА различных схем: вертолетов, самолетов, мультикоптеров, конвертопланов и других конфигураций. ГСУ обеспечивает генерацию, передачу электрической энергии и устанавливается взамен традиционных силовых установок, соединенных с узлами-потребителями на борту ЛА посредством механической связи.

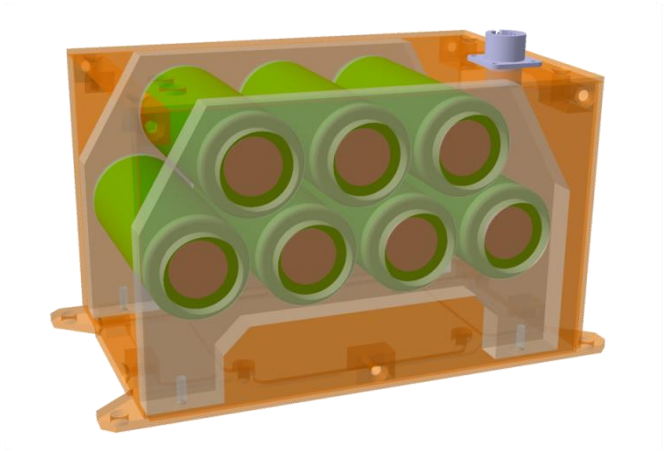
Схема последовательной ГСУ



Эскизы внешнего вида основных компонентов ГСУ

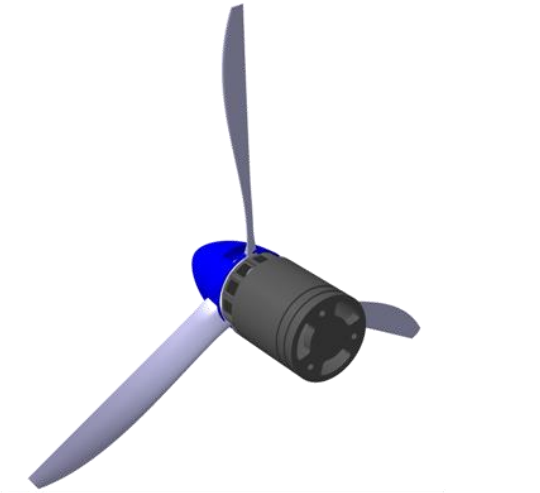


Двигатель-генератор с системой электронного впрыска



Буферная аккумуляторная батарея

Частотный регулятор вентильного электродвигателя



Вентильный электродвигатель

Барьеры создания эффективных ГСУ

- Низкая удельная энергия буферных источников питания, деградация характеристик с течением времени;
- Значительная масса силовой электроники и бортовой кабельной сети;
- Низкие удельные характеристики электрических машин и тепловых машин.

Основные пути улучшения характеристик компонентов ГСУ

- Стабилизация напряжения силовой бортовой сети за счет управления выходной мощностью теплового двигателя путем дросселирования;
- Выполнение силовой бортовой сети с напряжением до 400В;
- Повышение рабочей температуры электрических машин за счет использования термостойких компонентов;
- Минимизация емкости и массы буферных батарей.

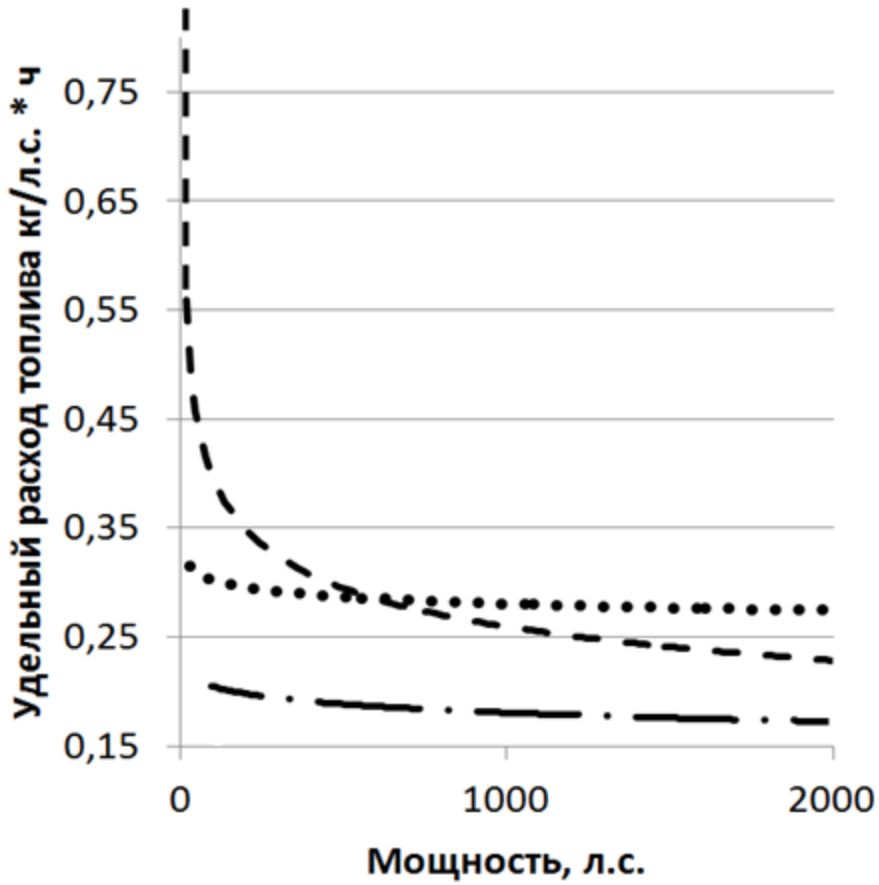
Расчет суммарной массы силовой установки

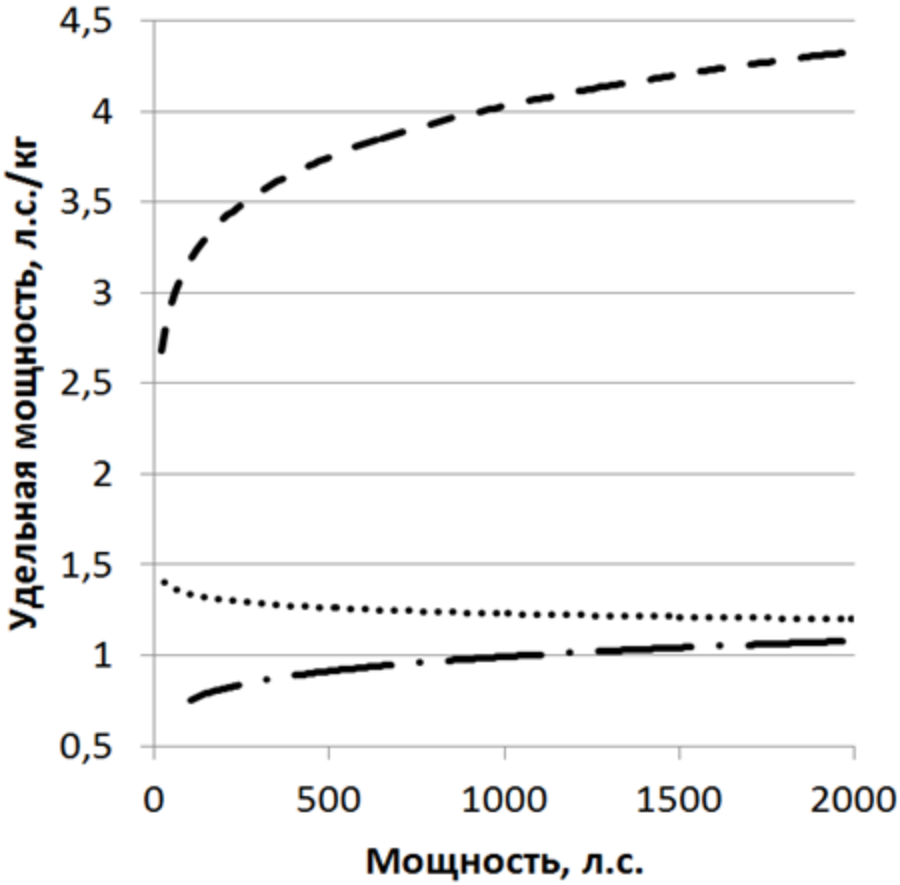
$$M = \frac{1}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{эд}}} \cdot \left(\frac{P_{\text{под}}}{P_{\text{уд}}} + \frac{P_{\text{под}} \cdot t_{\text{под}} + P_{\text{кр}} \cdot t_{\text{кр}} + P_{\text{пос}} \cdot t_{\text{пос}}}{E_{\text{уд}} \cdot \eta_{\text{двс}}} \right)$$

Варианты силовой установки для аппарата массой 600 кг

Конфигурация	Масса двигателя (генератора), кг	Масса топлива, кг	Итого, кг
Только ДВС	167	106	273
Только ТВД	63	206	269
ГСУ: высокомощный подъемный двигатель (ТВД) и экономичный крейсерский двигатель	45 (ТВД) + 37 (стартер-генератор) + 58 (ДВС)	113	253
ГСУ: электрохимическая батарея и экономичный крейсерский двигатель	43 (батарея) + 12 (стартер-генератор) + 58 (ДВС)	106	279
ГСУ: суперконденсатор и экономичный крейсерский двигатель	700 (суперконденсатор) + 12 (стартер-генератор) + 58 (ДВС)	106	876
ГСУ: высокомощный подъемный двигатель и топливные элементы	45 (ТВД) + 37 (стартер-генератор) + 62 (топливный элемент) +	5 (керосин) + 206 (водород)	355
Топливные элементы	200	223	423
Электролет: только аккумуляторные батареи	1583		

Зависимости удельных характеристик тепловых двигателей от мощности





Бензиновый двигатель

Дизельный двигатель

Газотурбинный двигатель

Сводная таблица конфигураций ГСУ

Масса аппарата	До 20 кг	20...600 кг	600...1000 кг	1000...5000 кг
Тепловой двигатель	Отсутствует	Бензиновый двигатель внутреннего сгорания/Газотурбинный двигатель	Дизельный двигатель внутреннего сгорания/Газотурбинный двигатель	Газотурбинный двигатель
Генератор	Отсутствует	7...15 кВт/кг		
Напряжение силовой бортовой сети	27...60В	100...400В		
Буферная батарея	Электрохимическая силовая	Электрохимическая, либо на основе ионисторов	Электрохимическая (только для обеспечения запуска двигателя)	Электрохимическая (только для обеспечения запуска двигателя)
Электрический мотор	7,5 кВт/кг	7...12 кВт/кг	10...15 кВт/кг	

Состав модулей ГСУ

Тип модуля ГСУ	Составные части модуля	Взлетная масса аппарата		
		25…100 кг	100…300 кг	300…600 кг
Подъемно-маршевый движитель МД	Вентильный электродвигатель	ВЭД-01	ВЭД-02	ВЭД-03
	Контроллер вентильного электродвигателя	КВЭД-01	КВЭД-02	КВЭД-03
Двигатель-генератор МДГ	Стартер-генератор	ВСГ -01	ВСГ-02	ВСГ-03
	Блок управления стартера-генератора	КВСГ-01СГ	КВСГ-02	КВСГ-03
	Двигатель внутреннего сгорания	2В70…2В183	2В240…2В350	4В700…4В2800
Блок аккумуляторных батарей АКБ	Аккумуляторная батарея	АКБ-01	АКБ-01	АКБ-01
	Блок зарядки и балансировка	ЗУ-01	ЗУ-01	ЗУ-01
	Устройство терморегулирования	УТР-01	УТР-01	УТР-01

Технические требования к компонентам ГСУ для БПЛА массой от 25 до 100 кг

Параметр	Значение
Удельная мощность генератора	5-10 кВт/кг
Удельная мощность поршневого двигателя	2 кВт/кг
Удельное потребление топлива	не более 350 г/л.с·ч
Удельная мощность электродвигателя	5 кВт/кг
Номинальное напряжение бортовой сети летательного аппарата, в который интегрируется ГСУ	27В
Максимальная высота над уровнем моря, на которой обеспечивается запуск ДВС	2500м
Предельная скорость заряда буферной батареи	не менее 10 С
Предельная скорость разряда буферной батареи	не менее 40 С
Степень автоматизации двигателя	2 согласно ГОСТ Р 55437-2013
Ресурс двигателя-генератора	не менее 600 часов до первого капитального ремонта, межремонтный ресурс – не менее 300 моточасов
Гарантийный ресурс	не менее 100 часов наработки или 6 месяцев с даты первого запуска, или 1 год с момента поставки
Температура эксплуатации изделий	от минус 40°С до плюс 50°С
Максимальный уровень шума при запущенном двигателе-генераторе	не более 92 dB
Предельно допустимые механические перегрузки:	вертикальная: положительная 10g, отрицательная -0,5 g не более 5 с, горизонтальная 3 g

Схема интеграции ГСУ на БВС самолетного типа

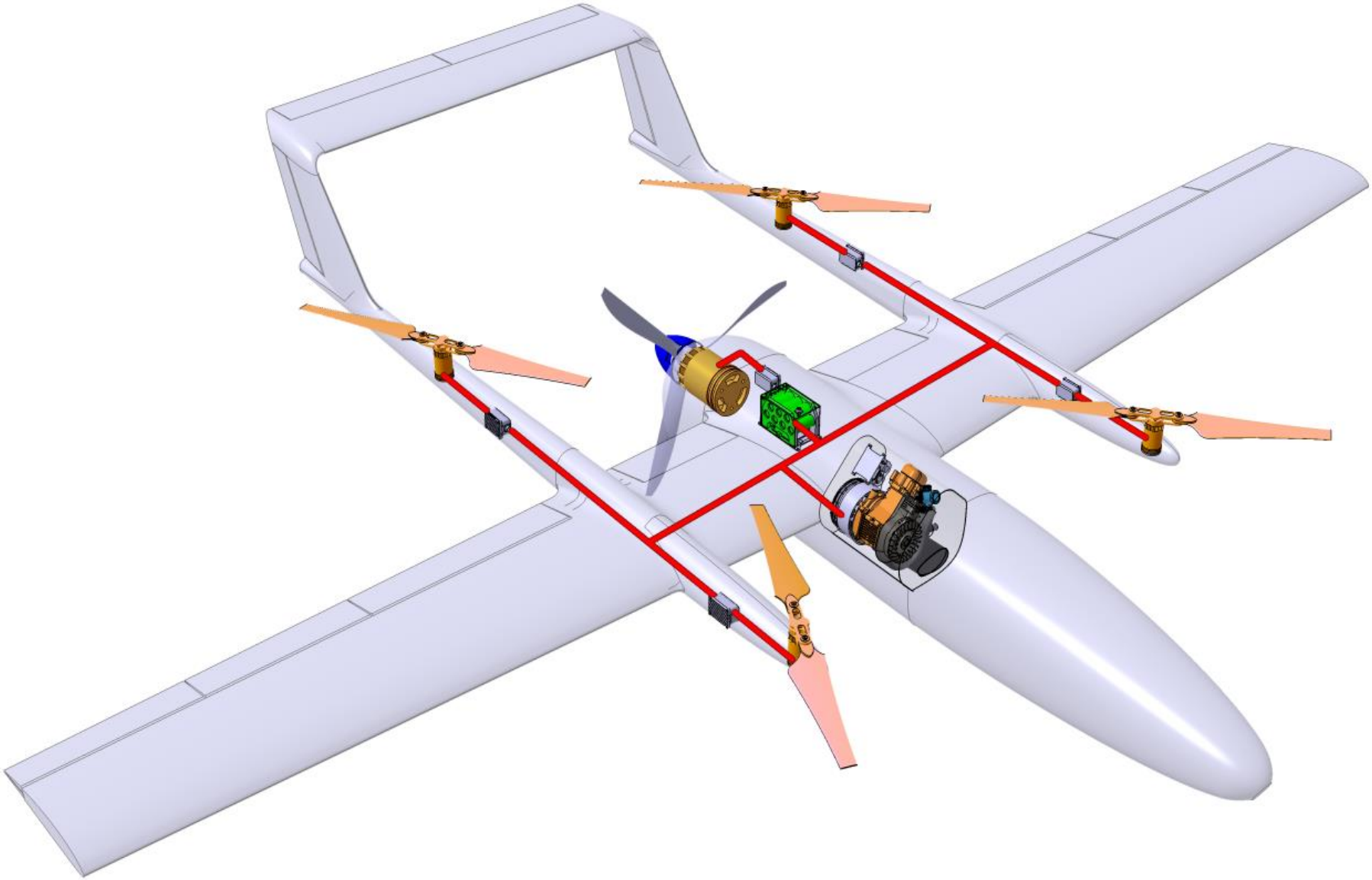


Схема интеграции ГСУ на БВС самолетного типа

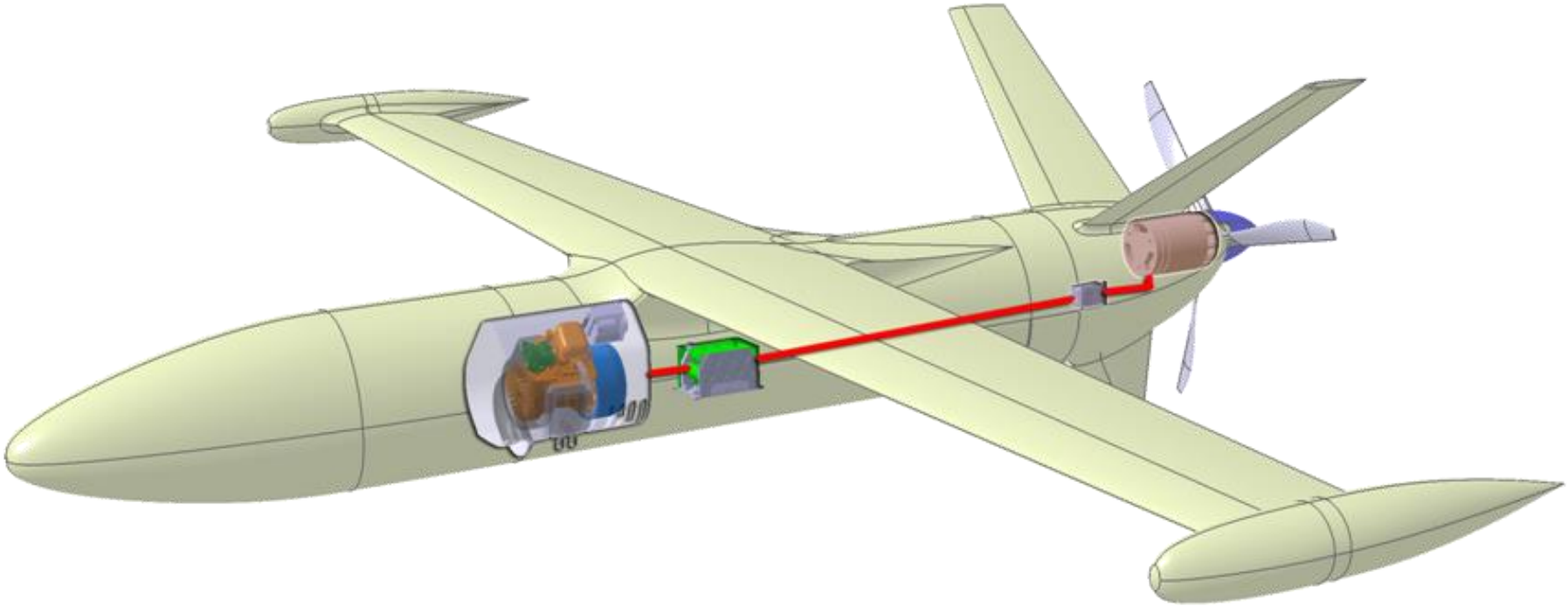


Схема интеграции ГСУ на БВС мультироторного типа

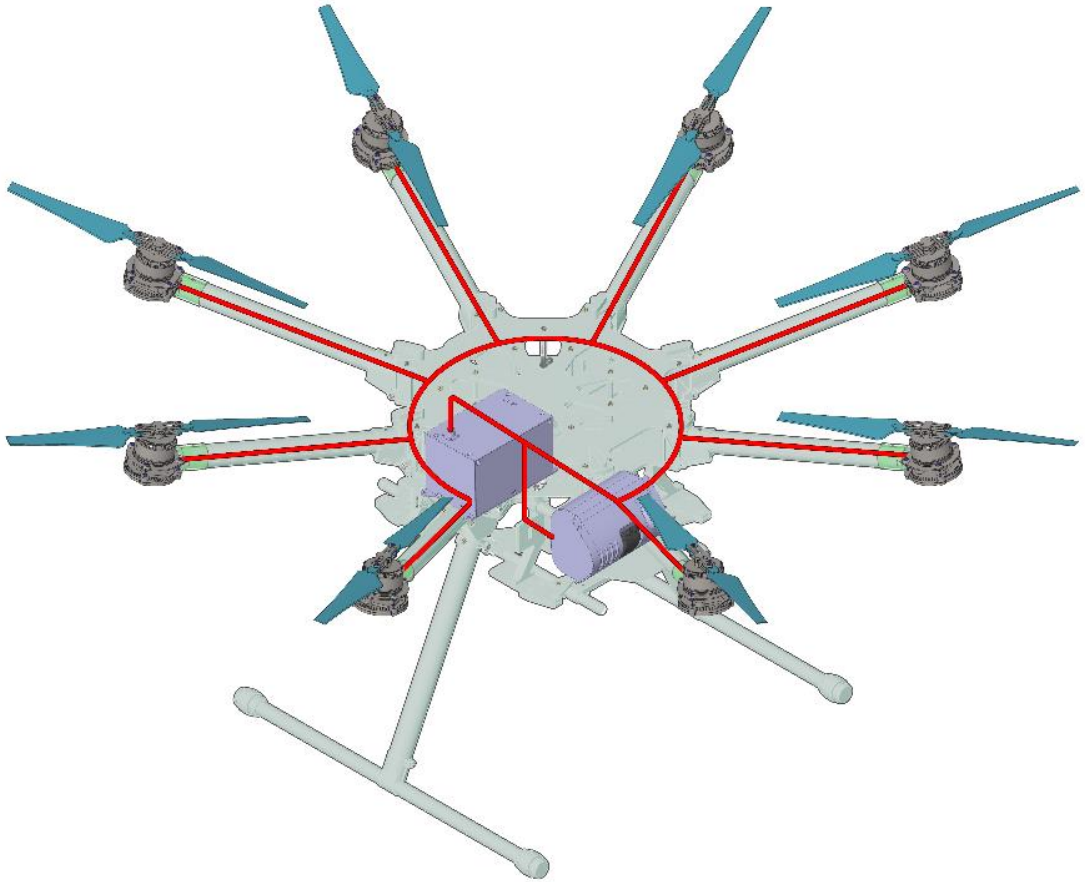
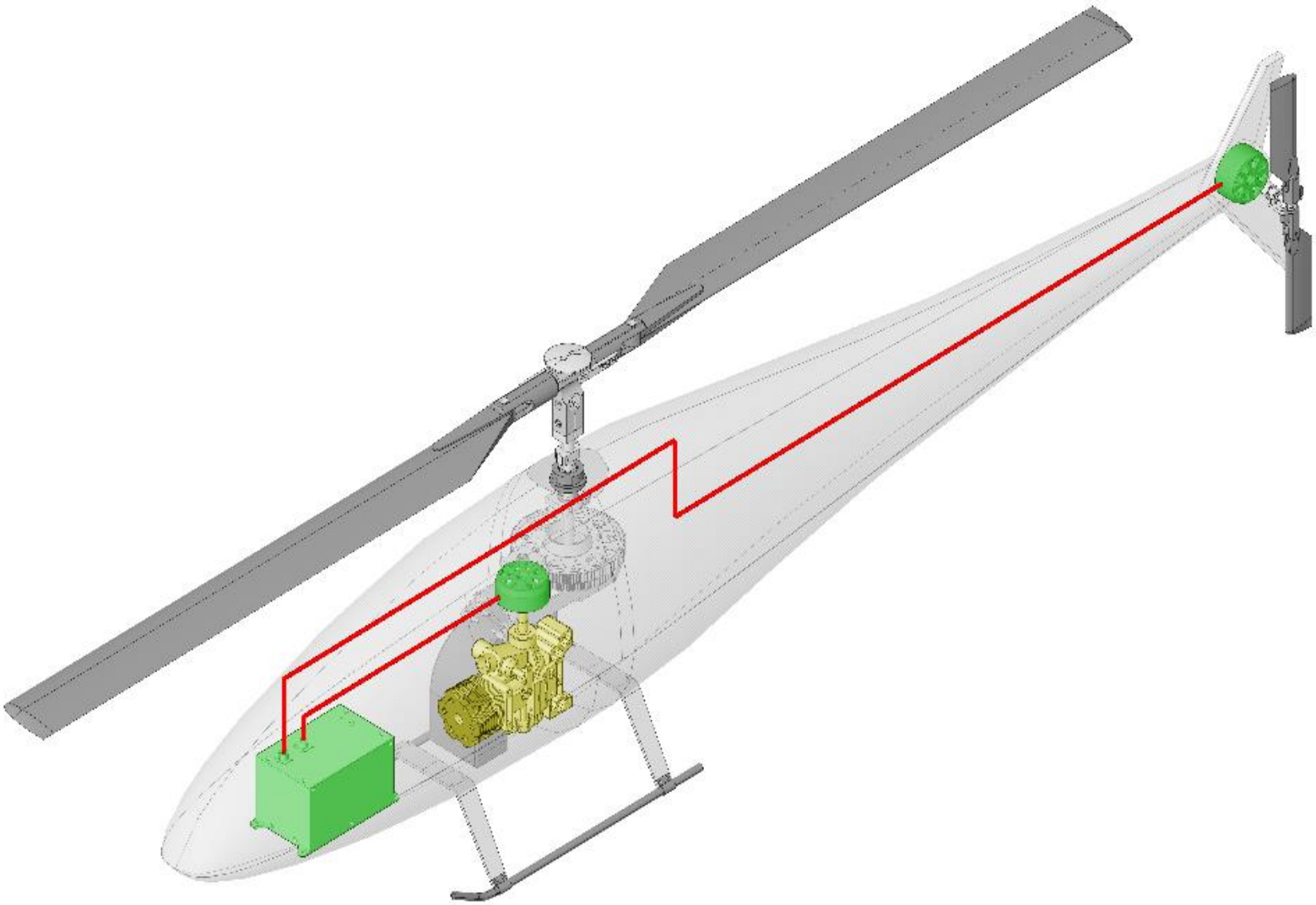
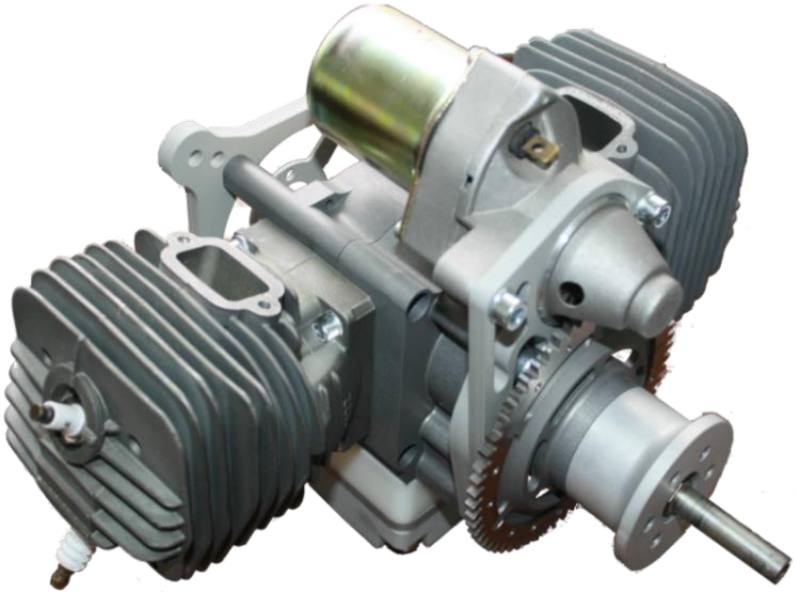


Схема интеграции ГСУ на БВС вертолетного типа



Часть 2

ИМЕЮЩИЙСЯ ЗАДЕЛ ПО ПРОДУКТАМ И ТЕХНОЛОГИЯМ

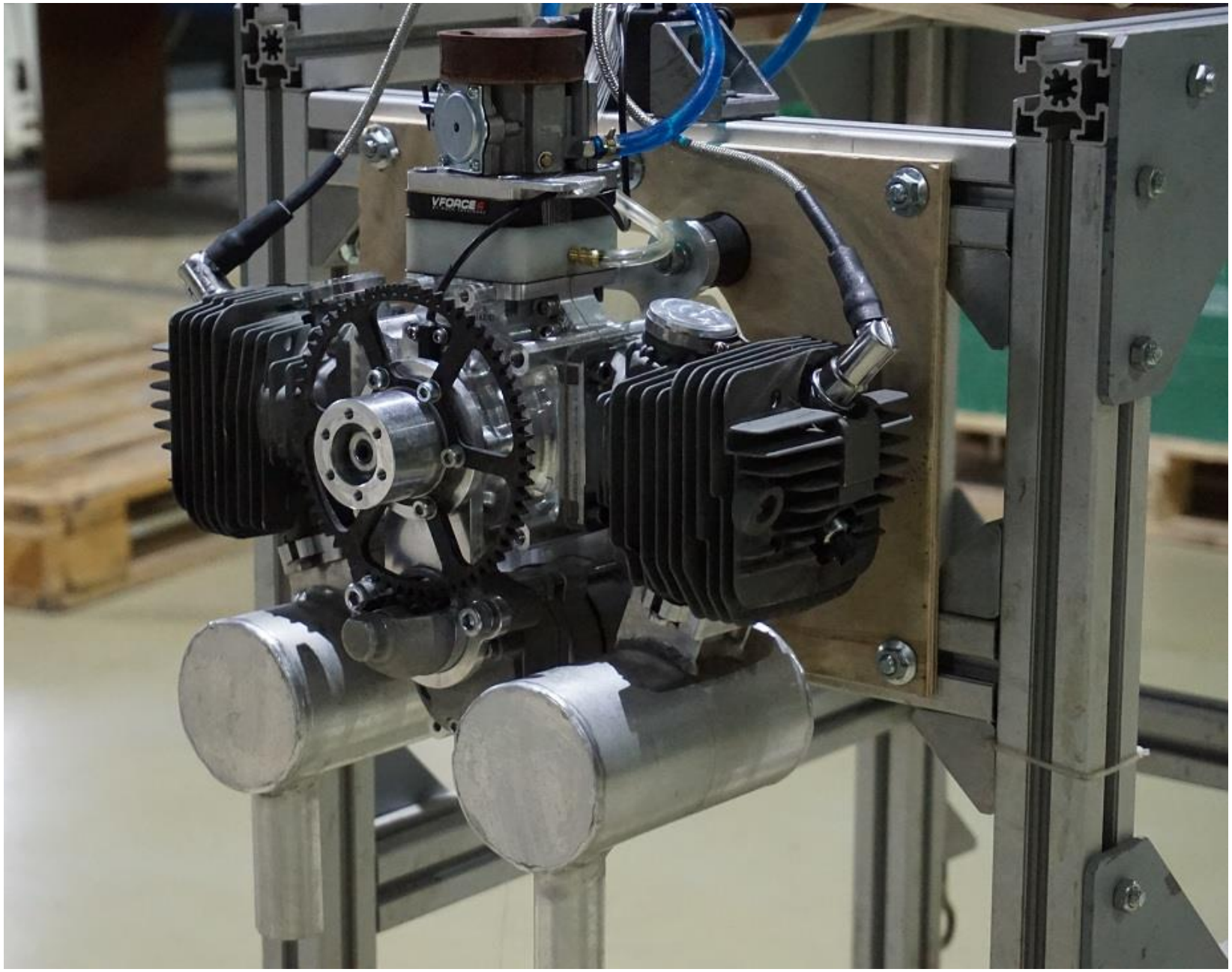


2B183

2B350

2B294

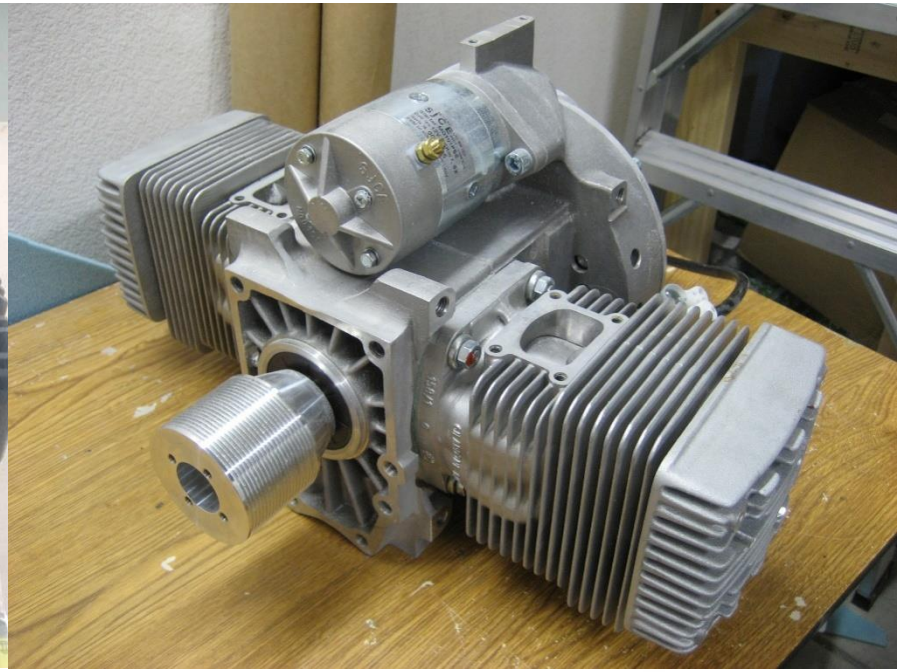
2B236

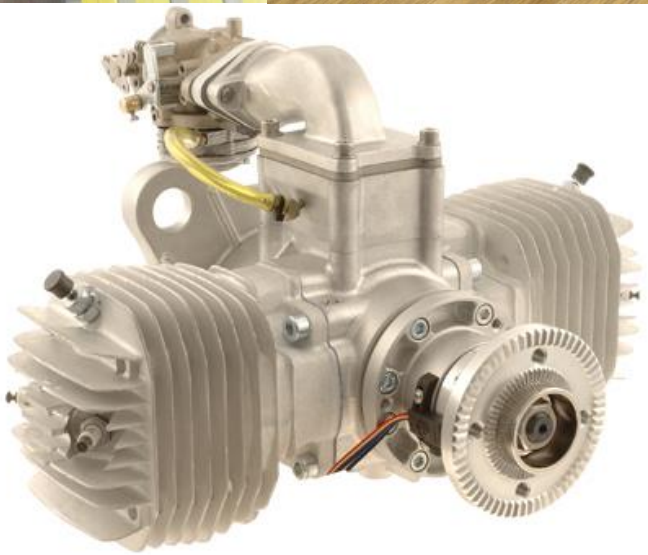


Сводная таблица созданных двухтактных ДВС

Обозначение двигателя	**2В350**	**2В294**	**2В183**	**2В121**	**2В90**
Тип	Двухтактный оппозитный				
Объём	350 $см^3$	294 $см^3$	183 $см^3$	121 $см^3$	90 $см^3$
Ход поршня	50 мм	43 мм	40 мм	35 мм	35 мм
Диаметр поршня	66 мм	66 мм	54 мм	47 мм	40 мм
Мощность	20,7 кВт (28 л.с)	15,5 кВт (21 л.с)	11 кВт (15 л.с)	8,2 кВт (11,2 л.с)	5 кВт (6.8 л.с)
Масса	9,0 кг в минимальной комплектации	7,4 кг в минимальной комплектации	4,5 кг в минимальной комплектации	2,6 кг в минимальной комплектации	2,6 кг в минимальной комплектации
Подача топлива	Карбюратор или централизованный впрыск				
Система зажигания	Магнето или электронное				
Охлаждение	воздушное				
Ресурс	1200 часов (каждые 300 часов замена ЦПГ)	1200 часов (каждые 300 часов замена ЦПГ)	1200 часов (каждые 300 часов замена ЦПГ)	800 часов (каждые 300 часов замена ЦПГ)	1000 часов (каждые 350 часов замена ЦПГ)
Топливная смесь	Бензин АИ 95 + 2% синтетического масла для двухтактных двигателей				

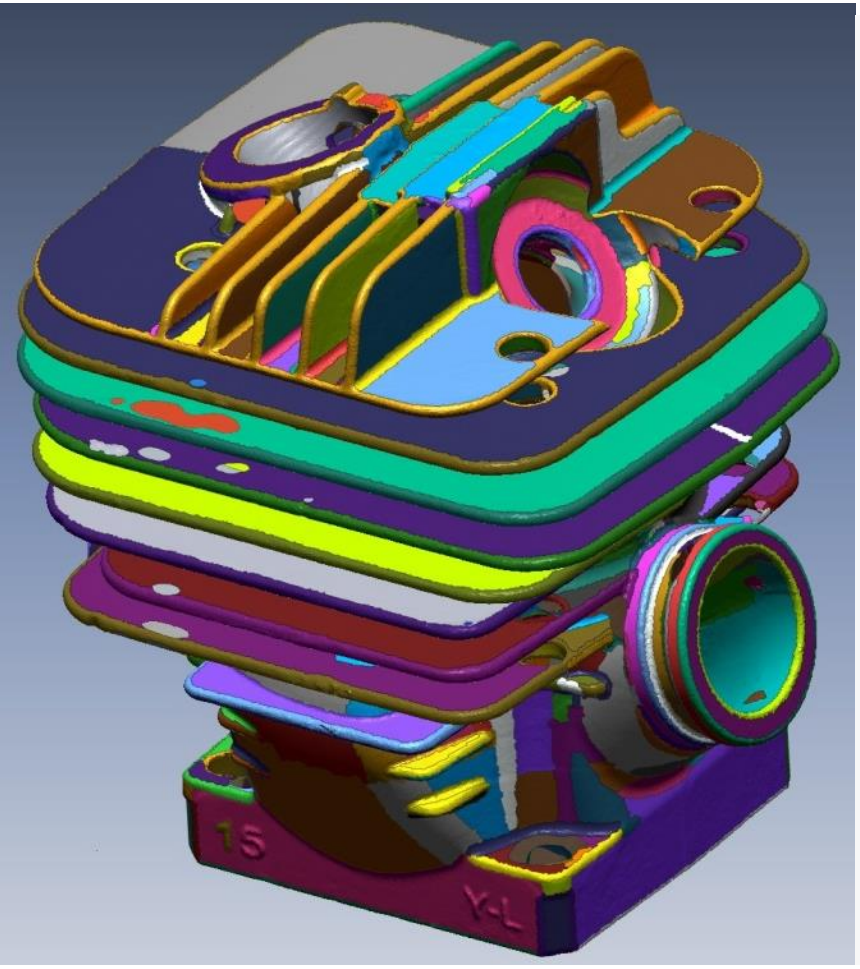
Анализ образцов БПЛА двигателей

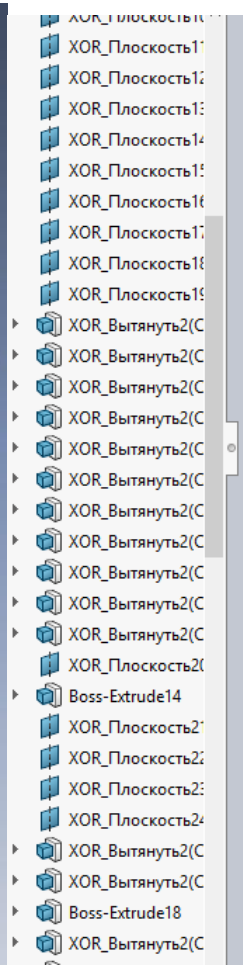


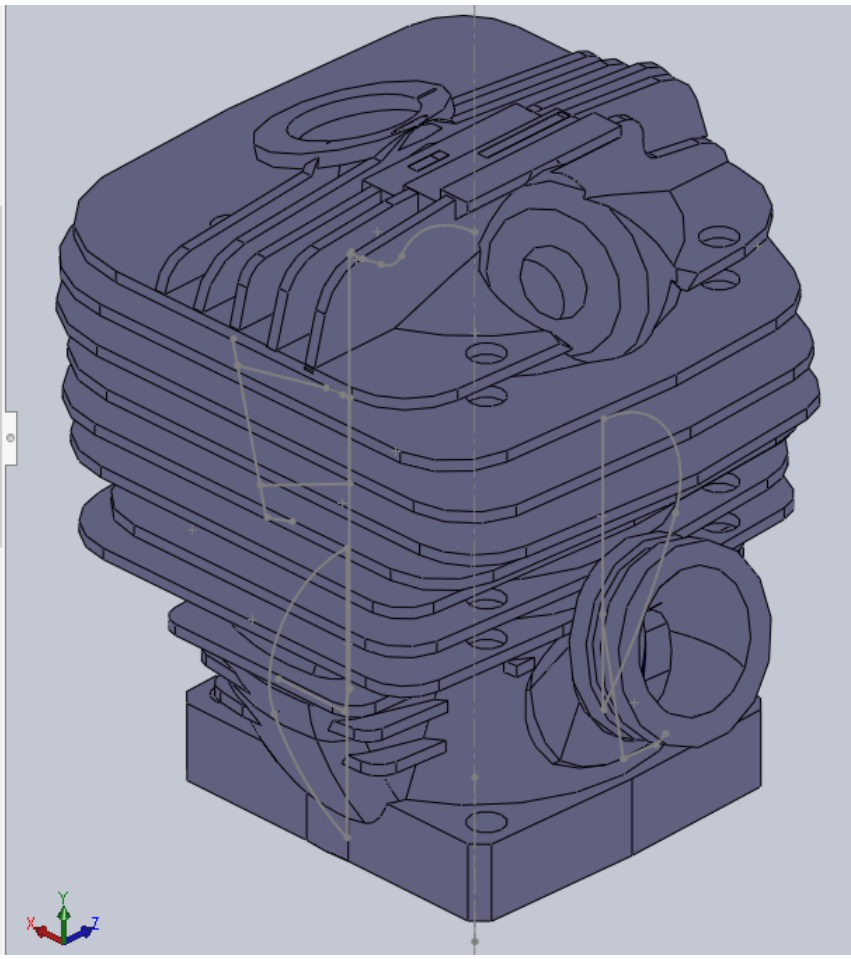


Анализ образцов двигателей парамоторов и модельных двигателей

Реверс-инжиниринг цилиндра ДВС

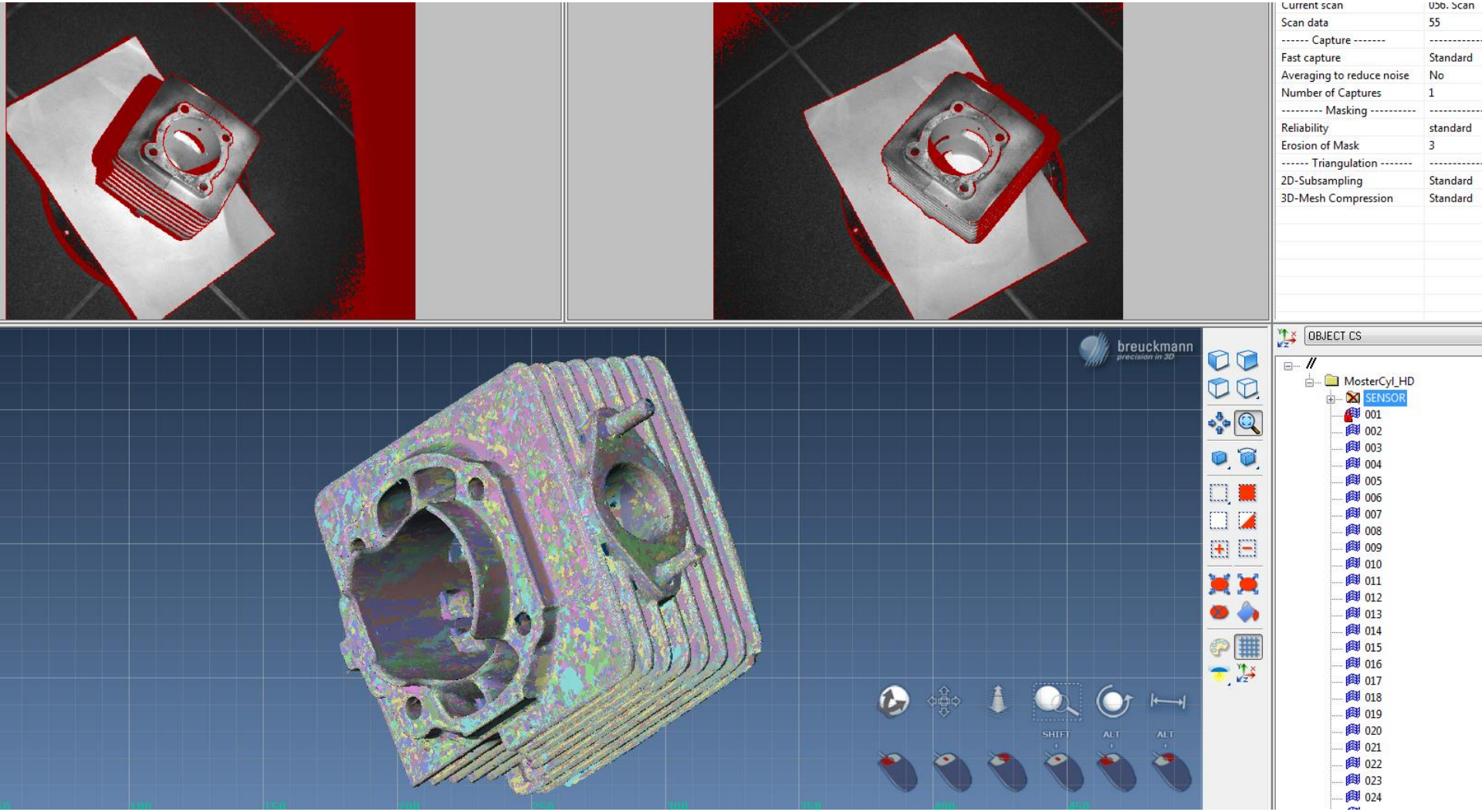




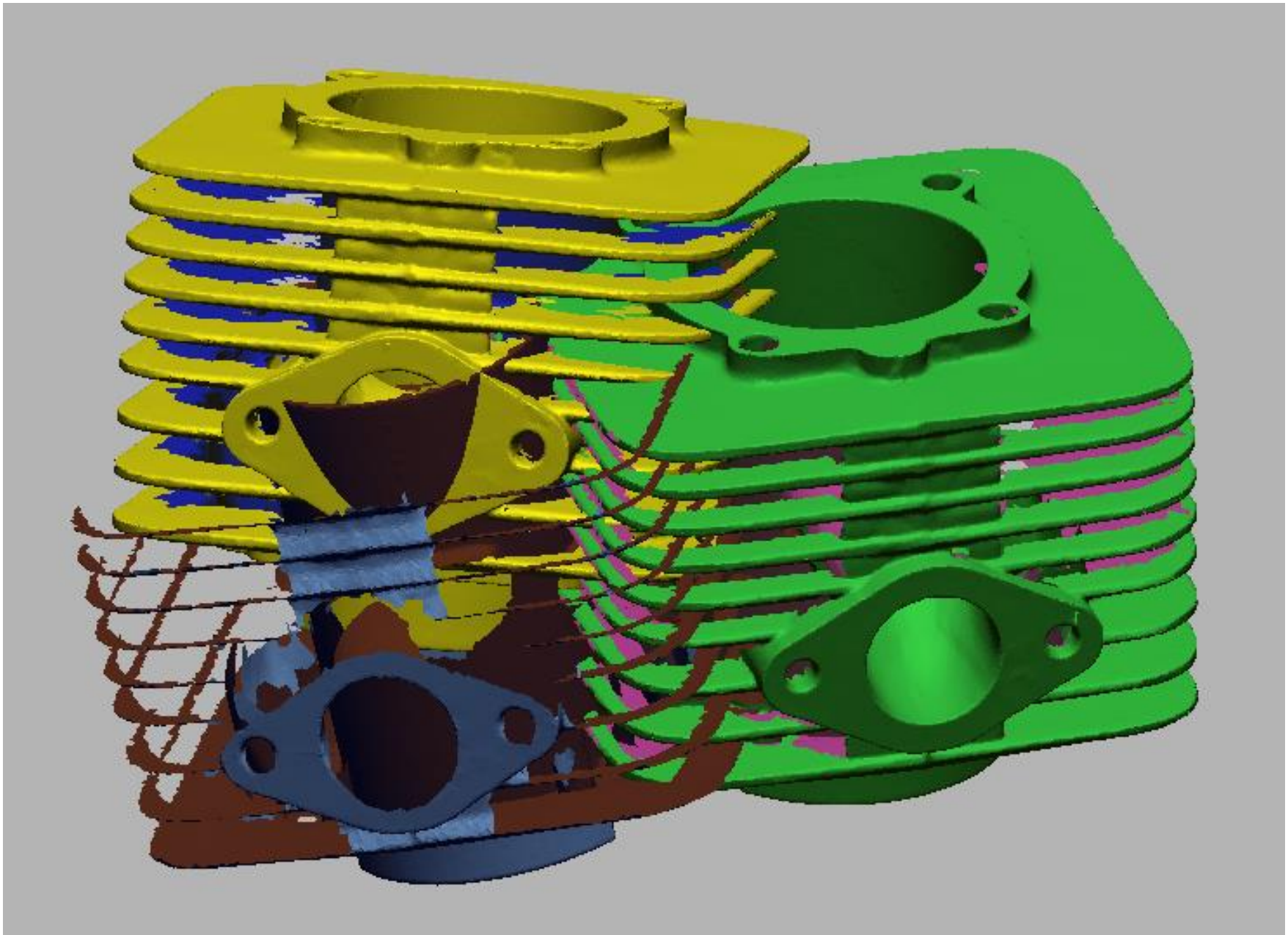


Процесс 3D сканирования

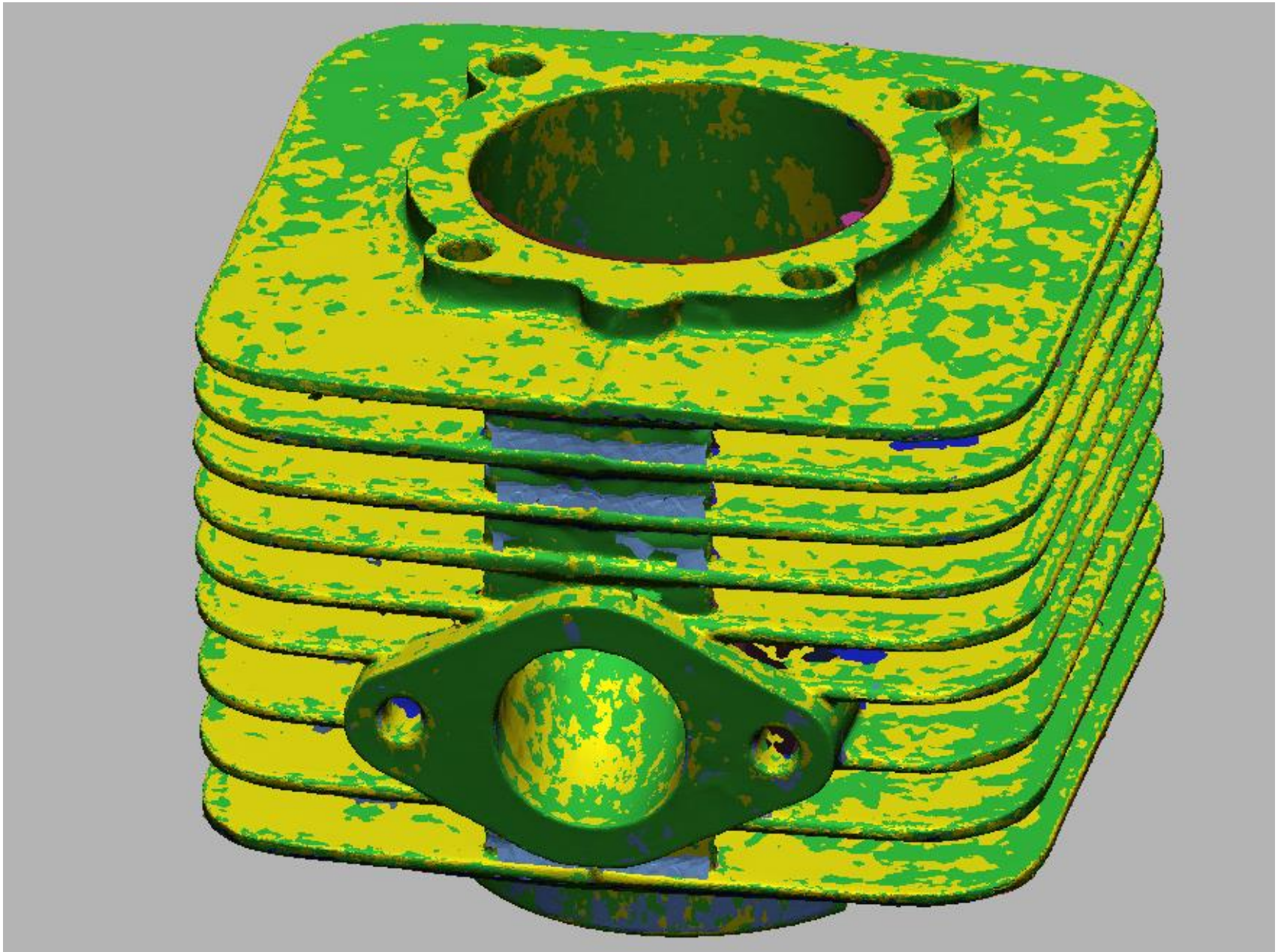
Процесс трёхмерного сканирования



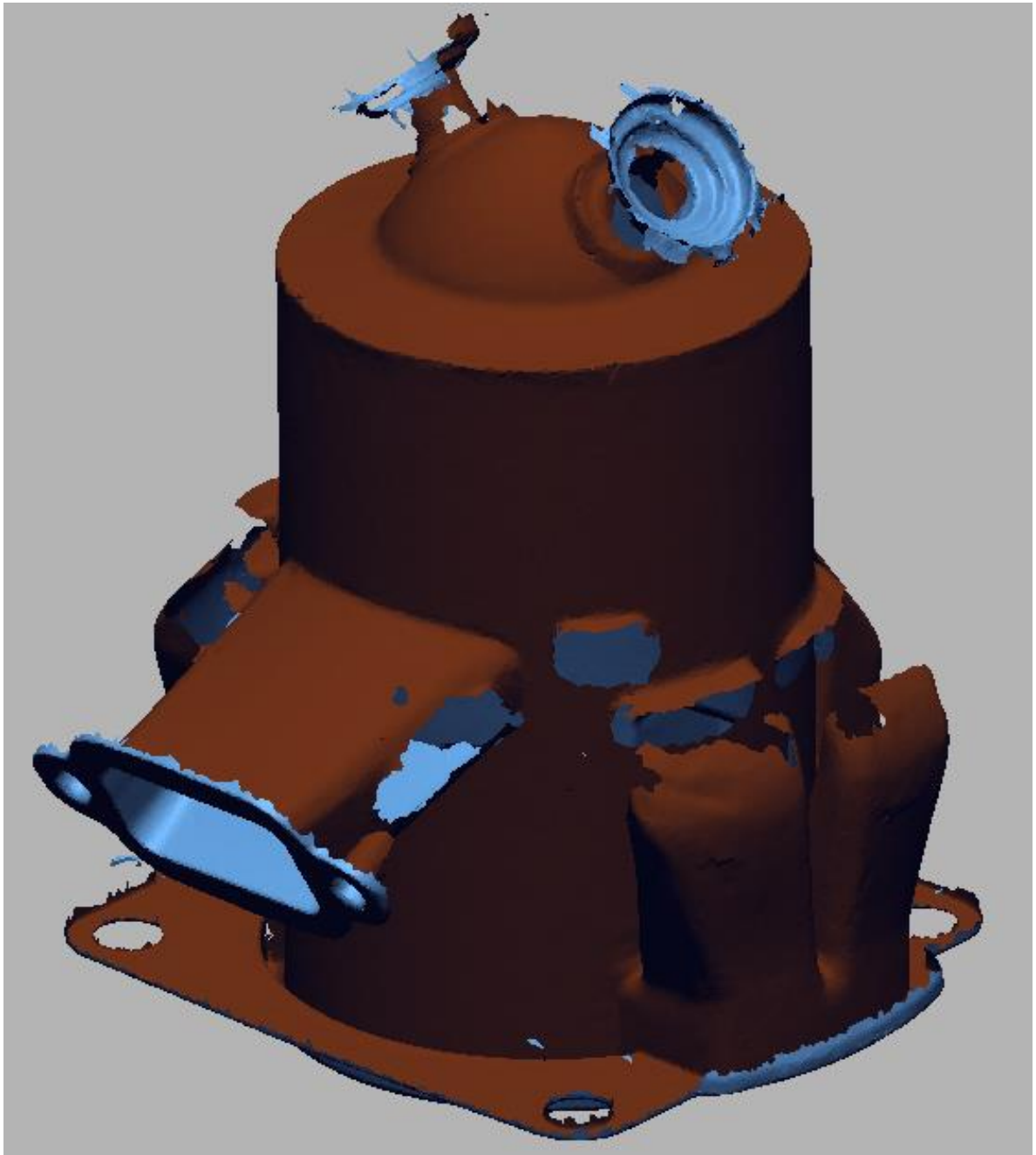
Создание полигональной модели из отдельных сканов



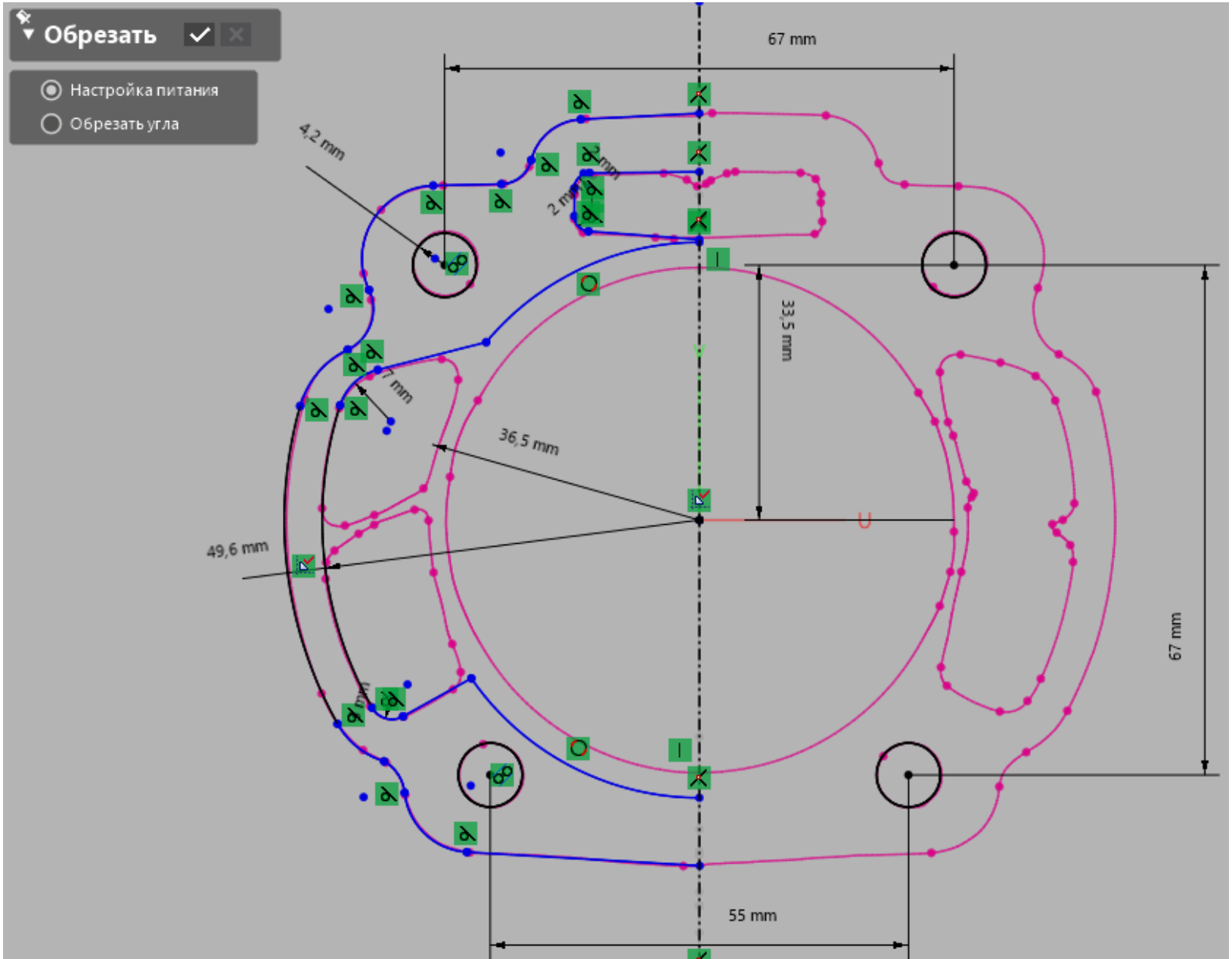
Создание полигональной модели из отдельных сканов



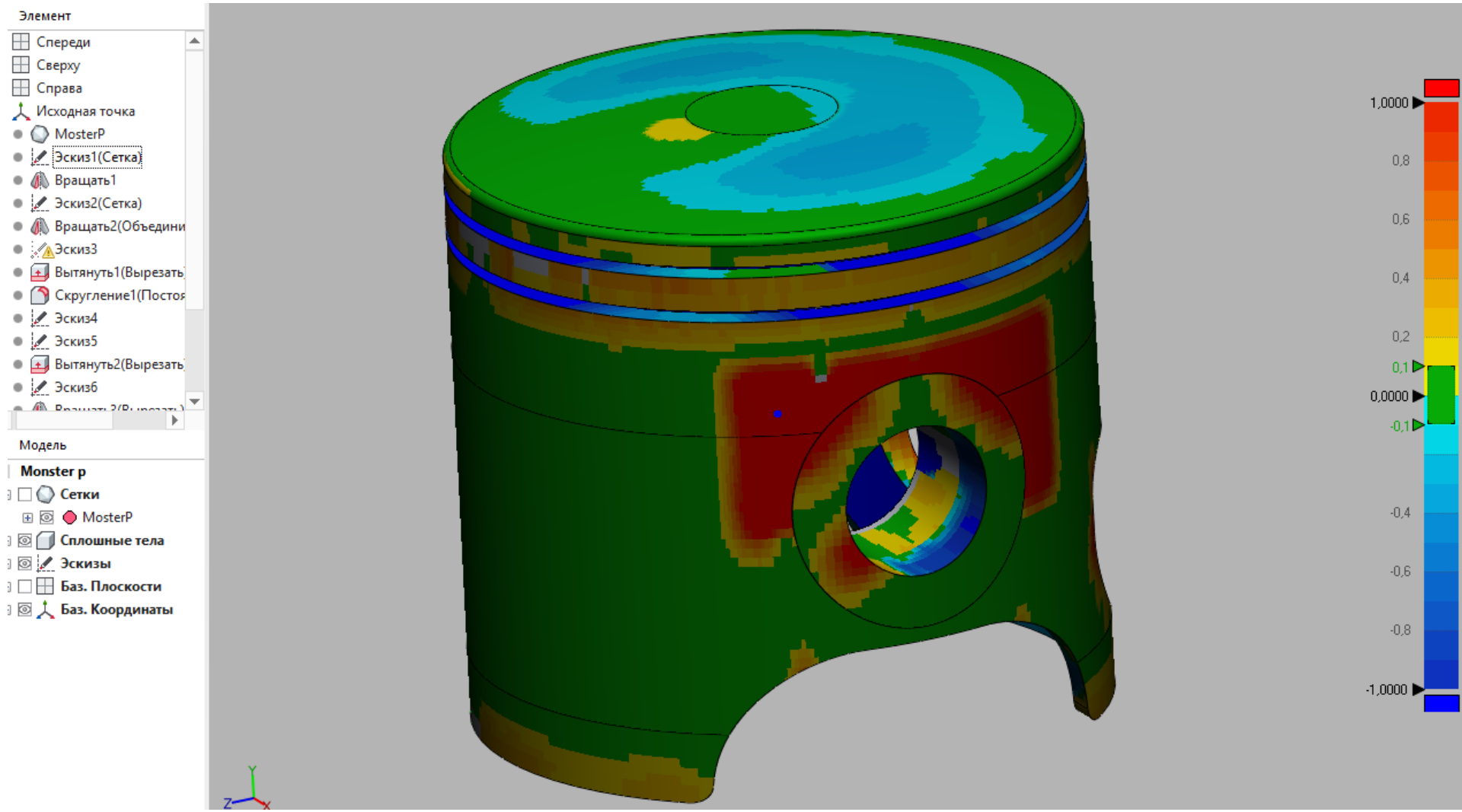
Сканирование внутренних полостей



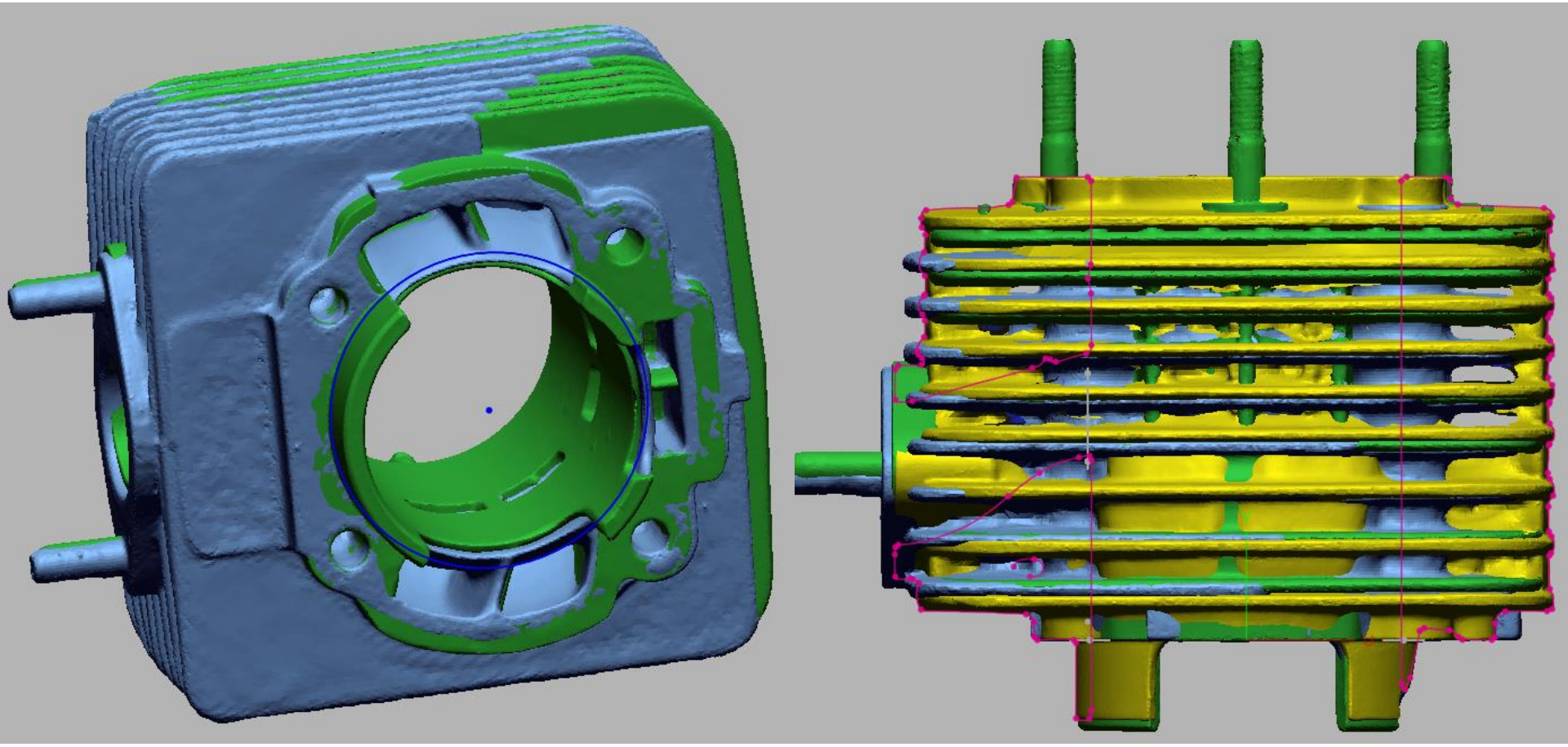
Процесс построения параметрической твердотельной модели



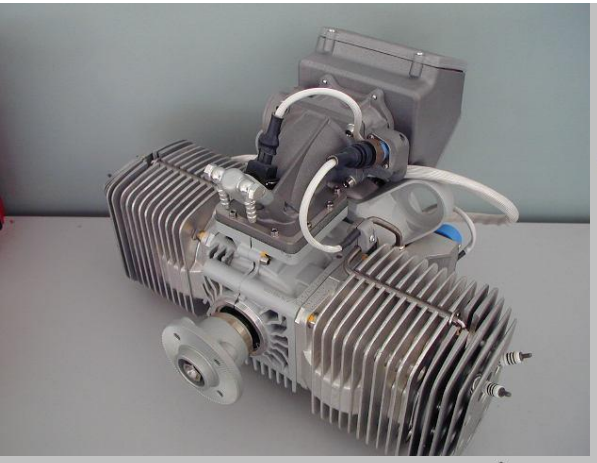
Процесс построения параметрической твердотельной модели, контроль точности процесса

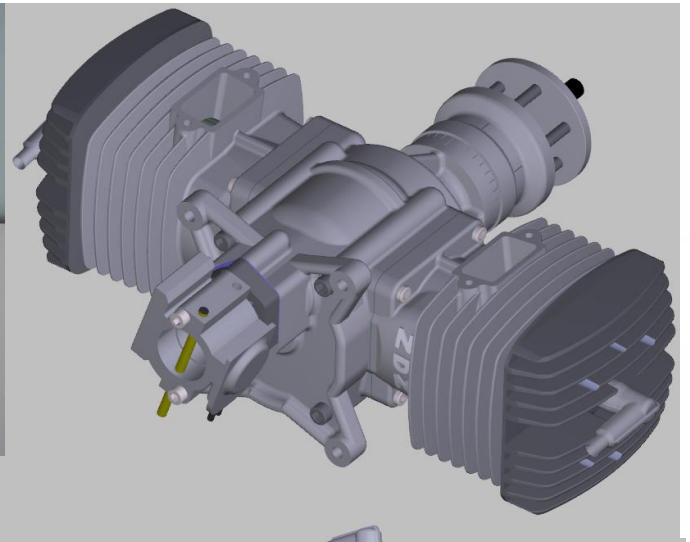


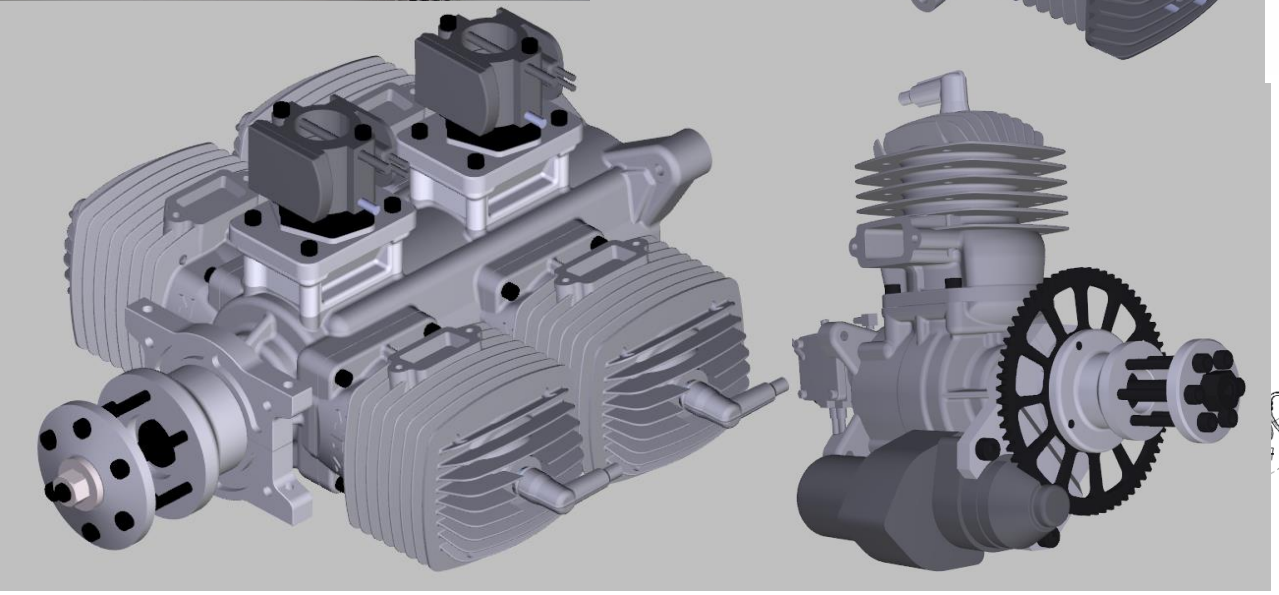
Сравнение 3 цилиндров парамоторов различных производителей

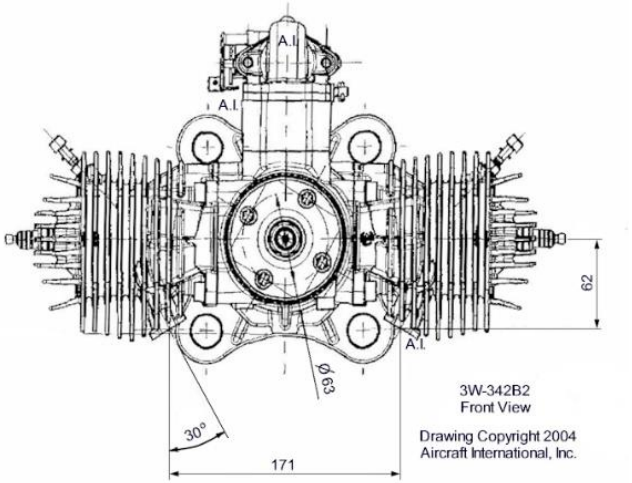


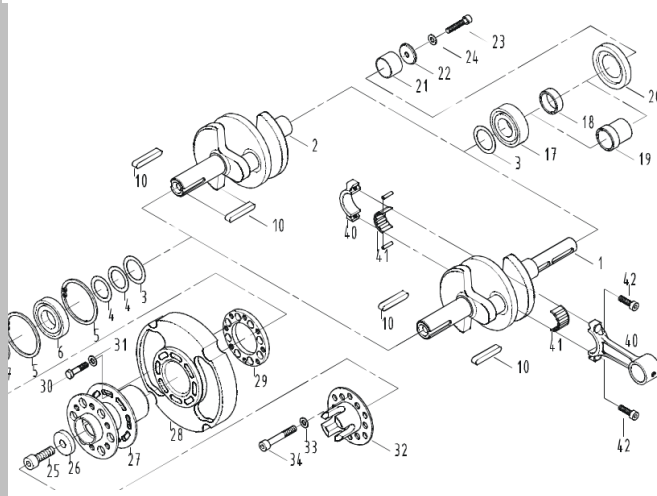
Реверс – инжиниринг. Извлечение геометрической информации из полигональных интернет-моделей, фотографий и технической документации



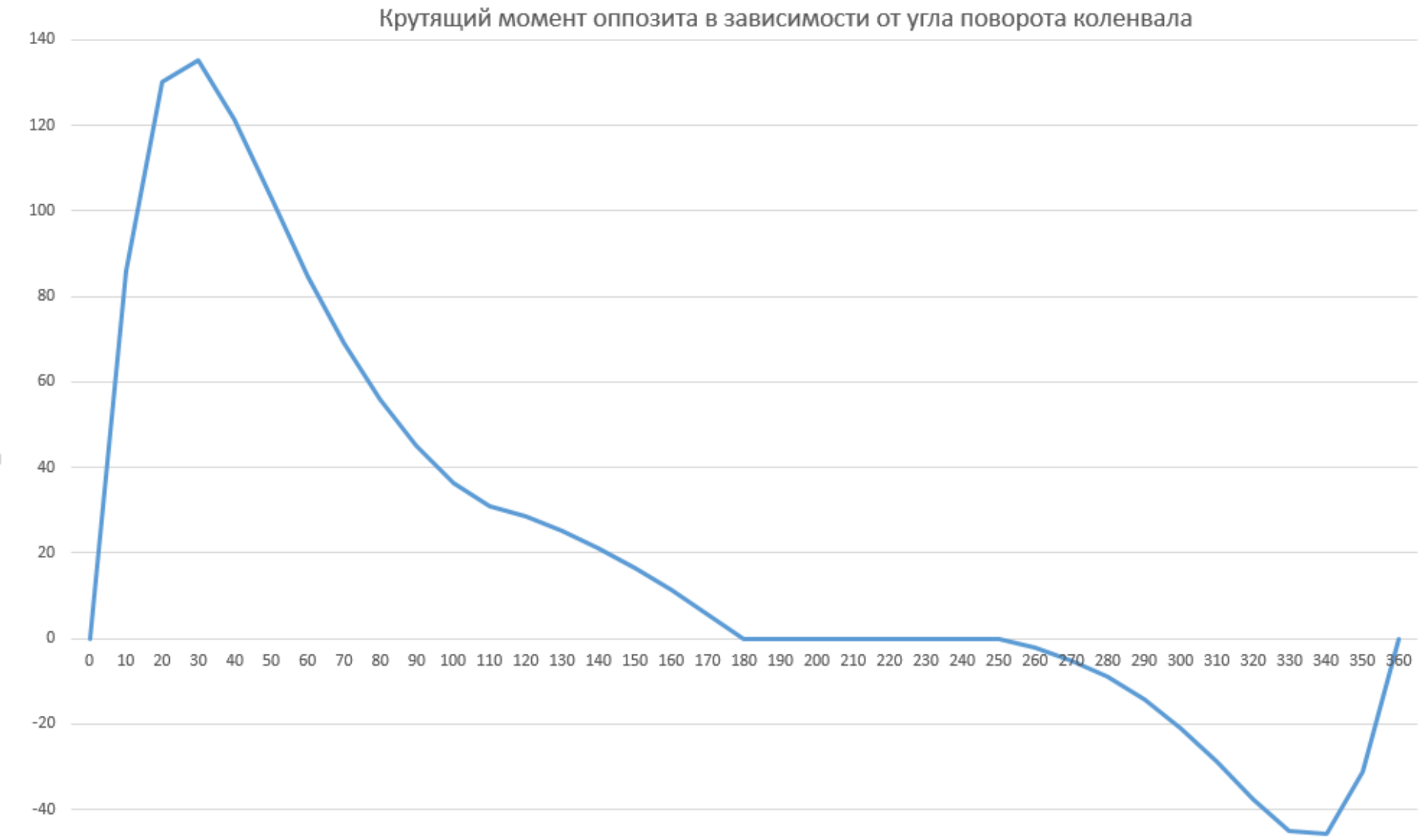




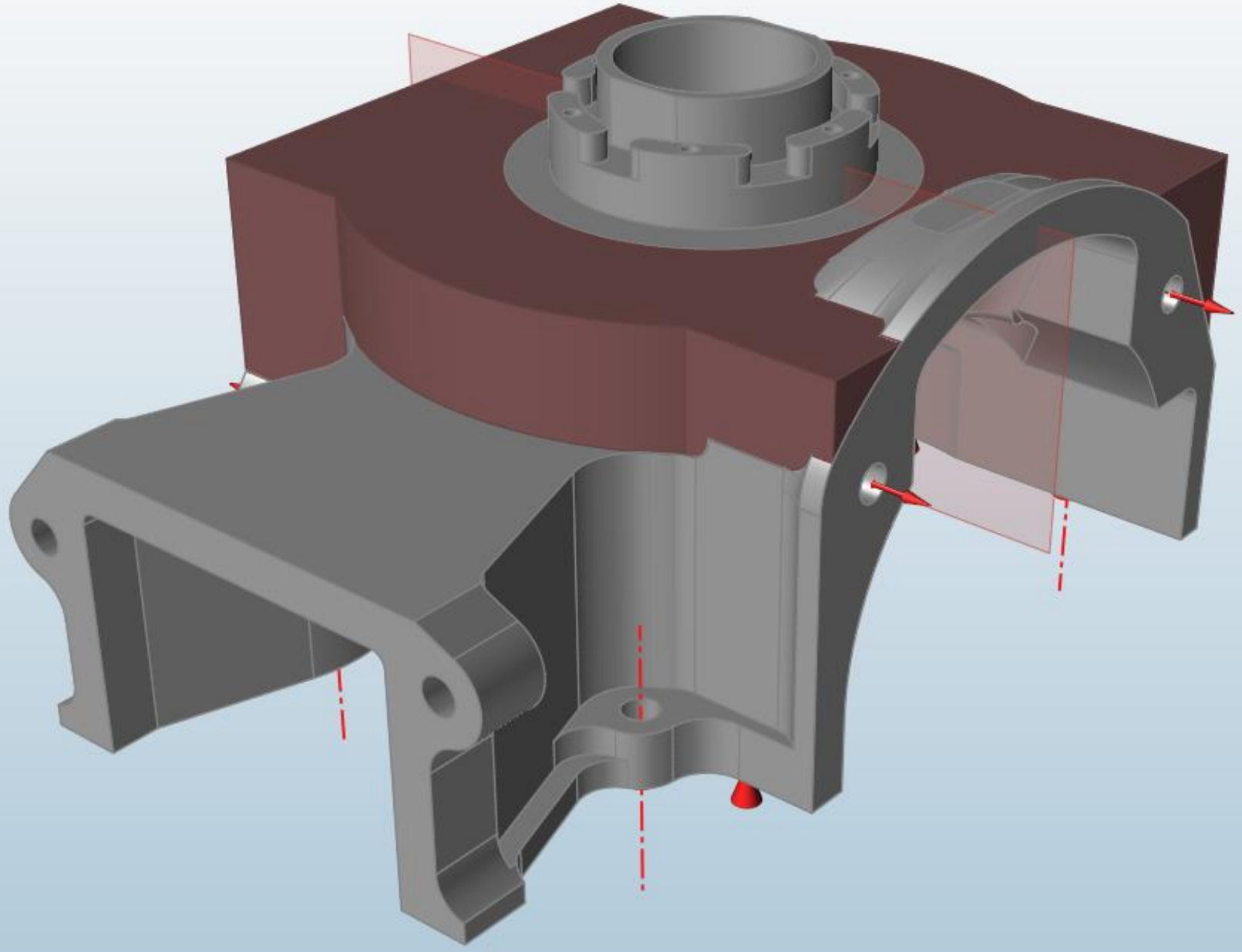




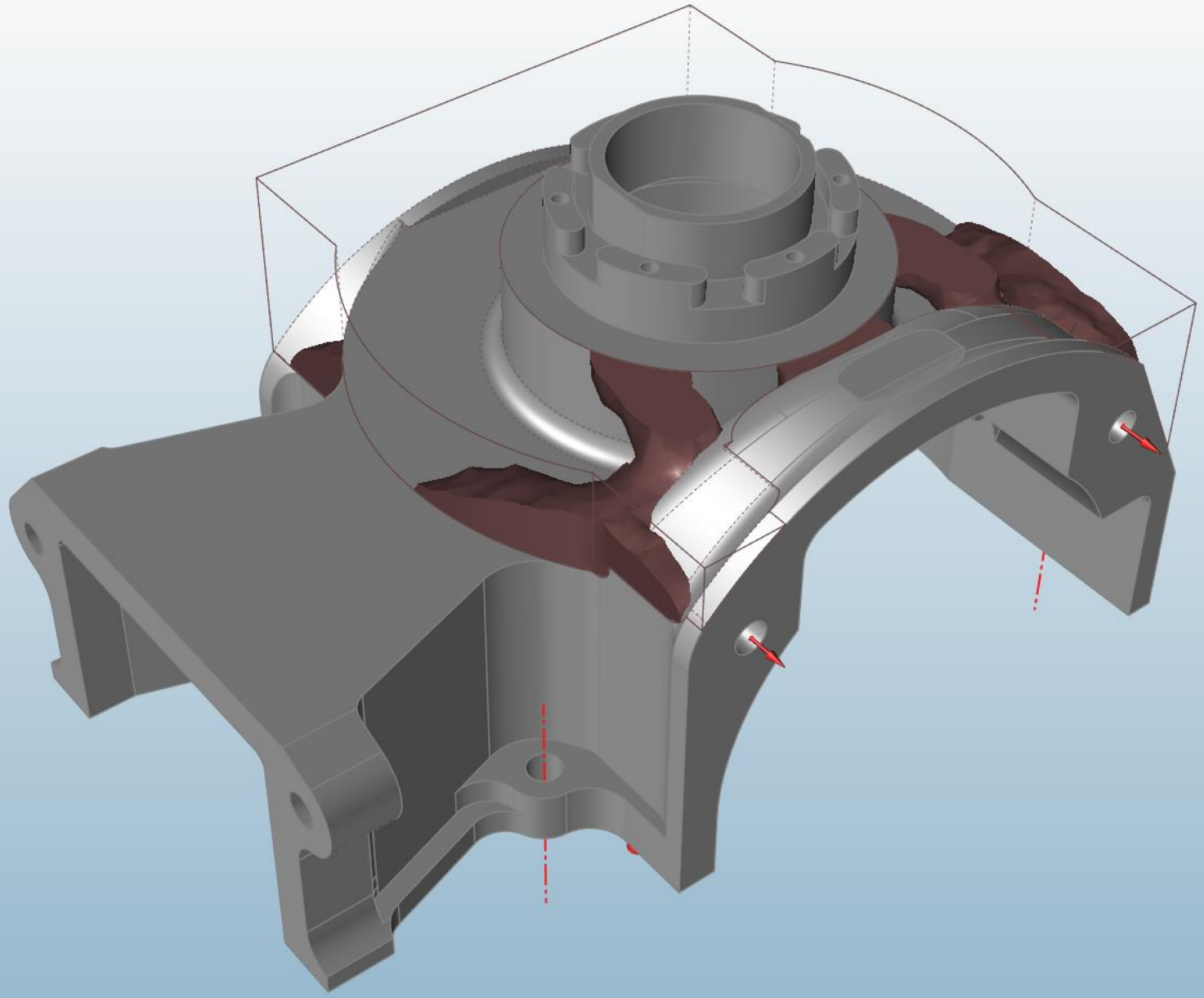
Расчеты на прочность. Граничные условия.



Топологическая оптимизация

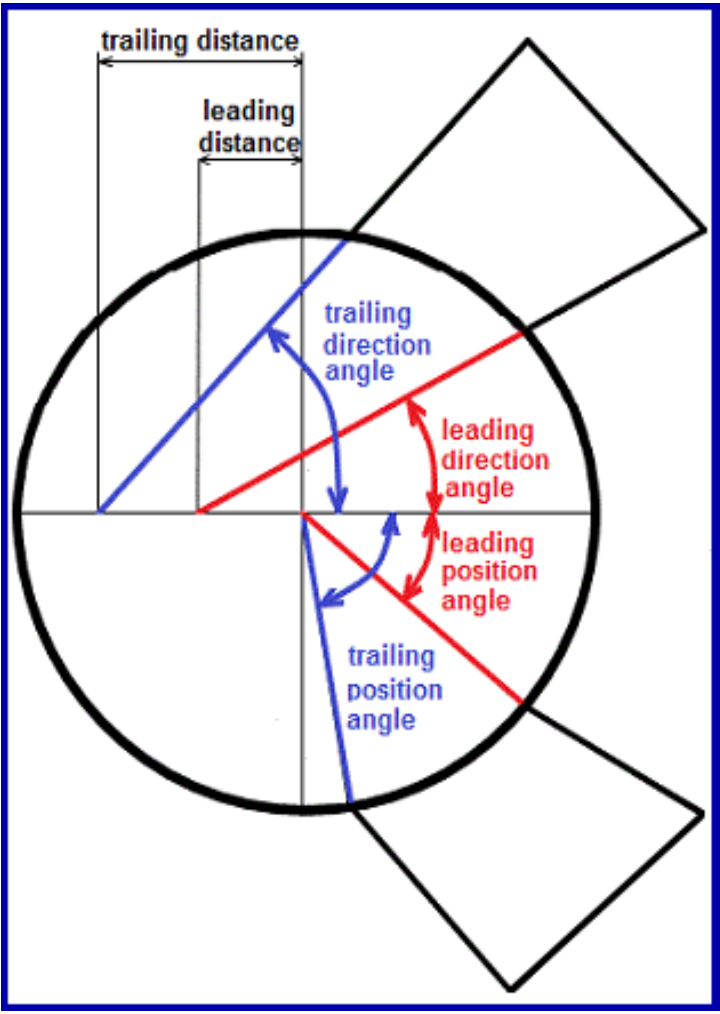


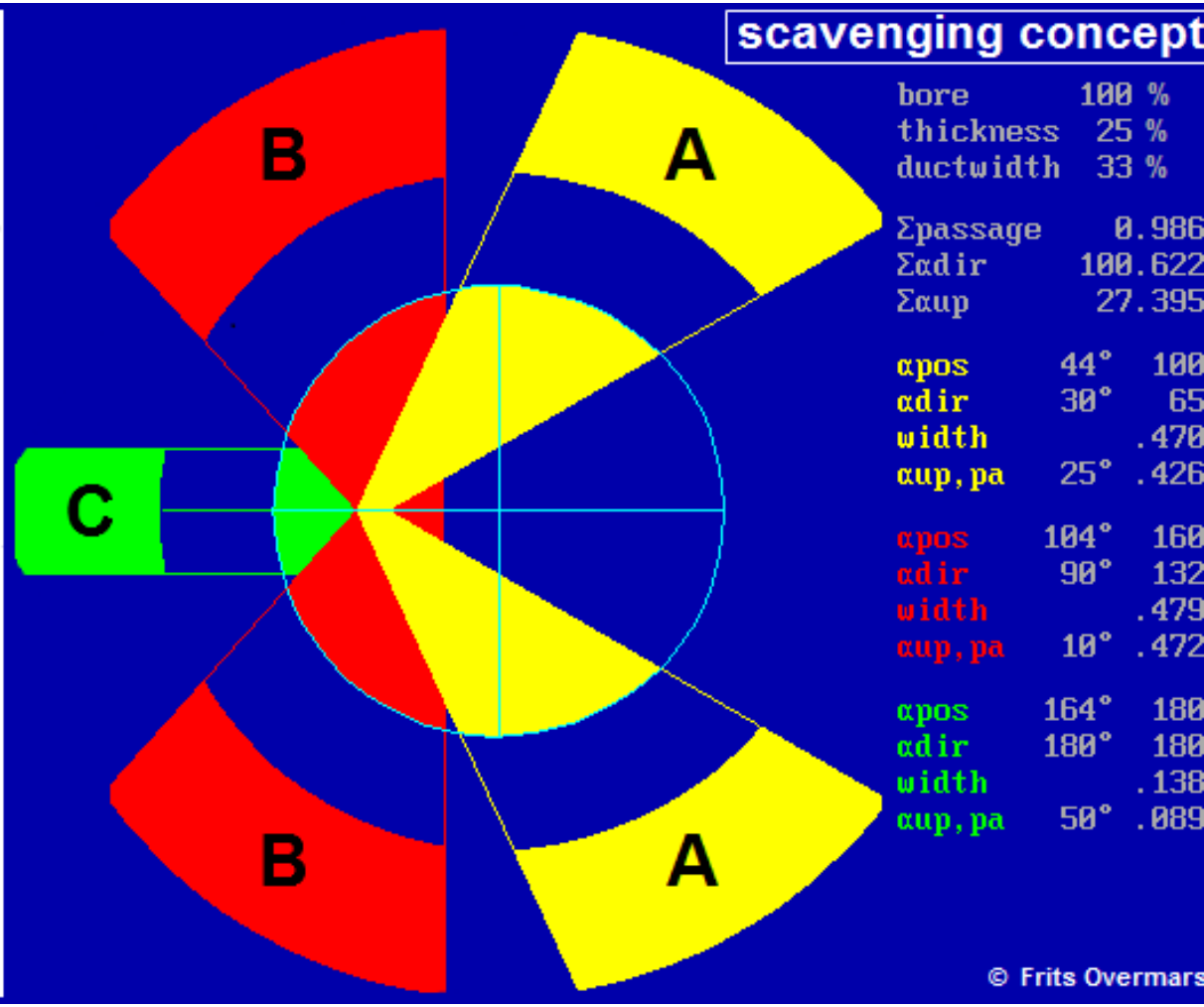
Топологическая и параметрическая оптимизация элементов конструкции



Двигатель с оптимизированным по нескольким расчётным случаям картером

ПО, основанное на статистических данных





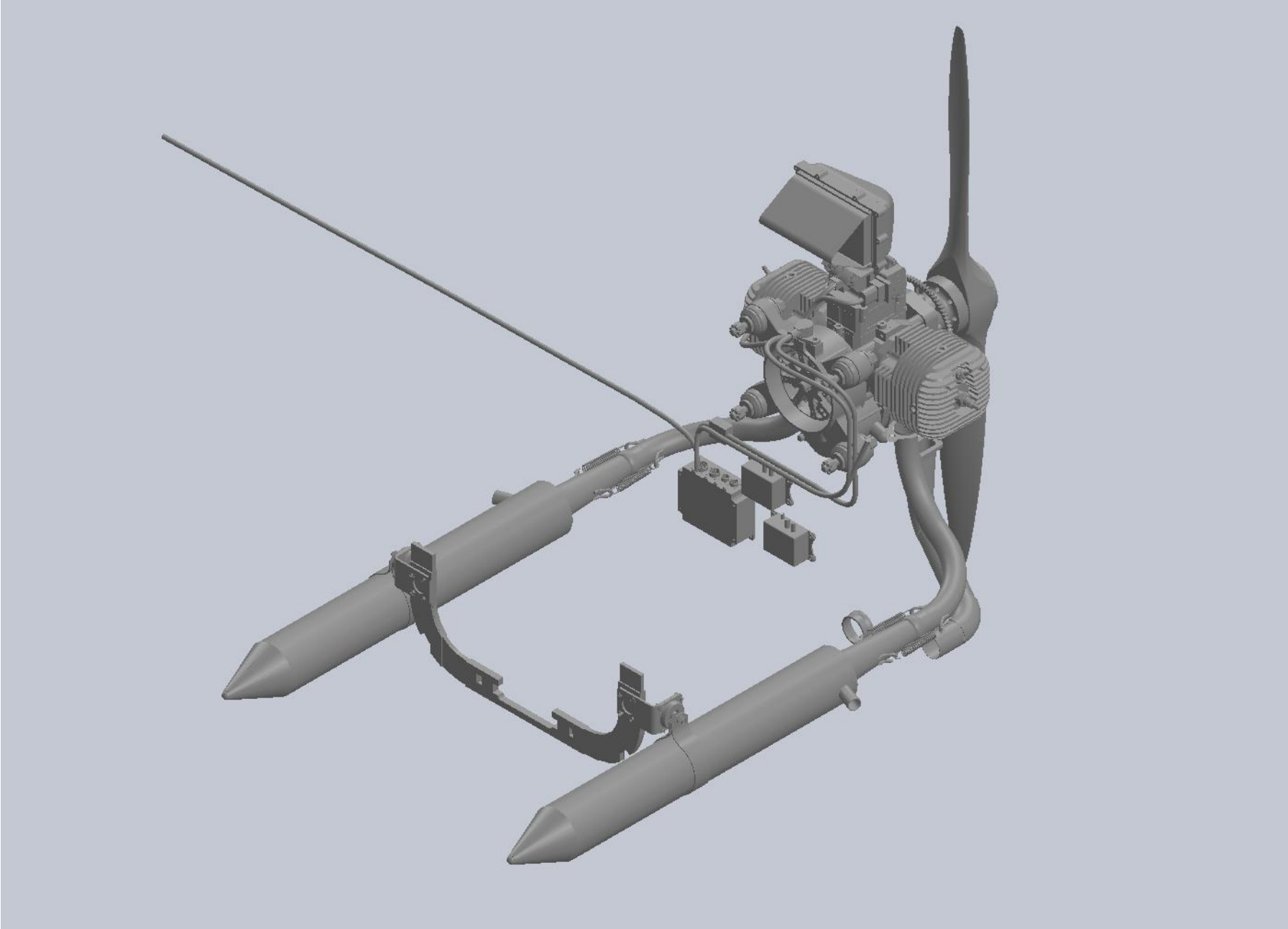
ПО, основанное на статистических данных

	B	C	D
4	Main dimensions		
5	Bore	40	mm
6	Stroke	40	mm
7	Connecting rod lenght	85	mm
8	Top volume	8	cm^3
9	Crank throw (b)	20,0	mm
10	Swept volume	50,3	cm^3
11	Trapped cyl. volume	33,9	cm^3
12	Compression ratio (Max. 1 : 6,5)	1 : 5,2	
14	Exhaust		
15	**Enter either 1 or 2 or 3**		
16	**(1)** Opening angle ATDC	0	°
17	**(2)** Port height	13	mm
18	**(3)** Port top dist. from TDC	0	mm
19	Width	17	mm
20	Top corner radii (min. 1,0mm)	3	mm
21	Bottom corner radii (min 1,0mm)	3	mm
22	Number of ports (equal sizes)	1	*1
23	Opening angle	103,7	°
24	Port height	13,00	mm
25	Port top dist.from tdc	27,00	mm
26	Angle when open	152,5	°
27	Specific time areas - Gordon P. Blairs method		
28	Exhaust target	0,0132	s/m
29	**Time-area ($s*mm^2/cm^3$)**	**0,0159**	**s/m**
30	Time-area ($sec*cm^2/cm^3$)	0,00016	$sec*cm^2/cm^3$
31	**Deviation from target**	**20,3**	**%**
32	Specific time areas - Gordon Jennings method		
33	Exhaust - MAX. target	0,00016	$sec*cm^2/cm^3$
34	Exhaust - MIN. target	0,00015	$sec*cm^2/cm^3$
35	**Time-area**	**0,00018**	**$sec*cm^2/cm^3$**
36	Angle-area	4,84	$deg*cm^2/cm^3$
37	**Deviation from target**	**10,8 % above MAX limit**	
38	Deviation Jennings vs. Blair	11,3	%

	F	G	H
4	Find Bmep		
5	**Enter (either 1 or 2) and 3**		
6	**(1)** Engine brake power output	0	kW
7	**(2)** Engine brake horse power	4	bhp
8	**(3)** Engine speed	4500	rpm
9	Typical values		
10	Enduro 8 Bar - Motocross 9 Bar - Road race 11 Bar		
11	Brake, mean effective pressure	7,9	Bar
12		115	Psi
14	Transfers 1'st set		
15	**Enter either 1 or 2 or 3**		
16	**(1)** Opening angle ATDC	0	°
17	**(2)** Port height	7,4	mm
18	**(3)** Port top dist. from TDC	0	mm
19	Width	16	mm
20	Top corner radii (min. 1,00mm)	1	mm
21	Bottom corner radii (min 1,00mm)	1	mm
22	Number of ports (equal sizes)	2	*1
23	Opening angle	123,1	°
24	Port height	7,40	mm
25	Port top dist.from tdc	32,60	mm
26	Angle when open (duration)	113,7	°
27	Sum of all transfers specific time areas - G. P. Blairs method		
28	Transfer ports target	0,0133	s/m
29	**Time-area ($s*mm^2/cm^3$)**	**0,0131**	**s/m**
30	Time-area ($sec*cm^2/cm^3$)	0,00013	$sec*cm^2/cm^3$
31	**Deviation from target**	**-1,1**	**%**
32	Specific time areas - Gordon Jennings method		
33	Transfer ports - MAX. target	0,00010	$sec*cm^2/cm^3$
34	Transfer ports - MIN. target	0,00008	$sec*cm^2/cm^3$
35	**Time-area**	**0,00015**	**$sec*cm^2/cm^3$**
36	Angle-area	3,97	$deg*cm^2/cm^3$
37	**Deviation from target**	**32,0 % above MAX limit**	
38	Deviation Jennings vs. Blair	10,8	%

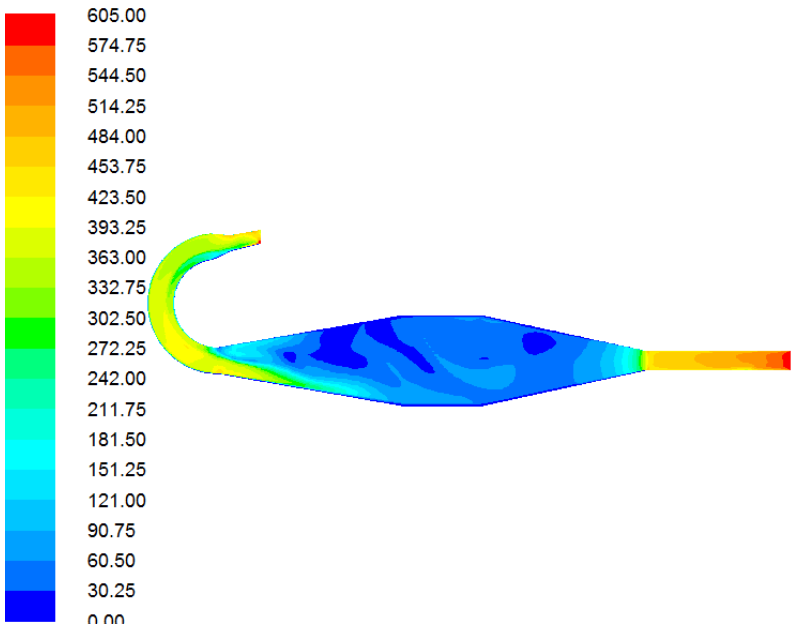
	J	K	L
4	Resulting piston velocity and acceleration		
5	Mean piston speed	6,0	m/s
6	Max. piston speed	9,7	m/s
7	Max. piston acc.	5486	m/s^2
8	Piston MAX. acc. compared to earth	559	g
9	Specific time areas Blowdown (Blair only)		
10	Blowdown target	0,00075	s/m
11	Time area	0,00066	**s/m**
12	Deviation from Blair target	-12,1	%
14	Transfers 2'nd set (if present)		
15	**Enter either 1 or 2 or 3**		
16	**(1)** Opening angle ATDC	0	°
17	**(2)** Port height	0	mm
18	**(3)** Port top dist. from TDC	0	mm
19	Width	0	mm
20	Top corner radii (min. 1,00mm)	1	ERROR, check agains
21	Bottom corner radii (min 1,00mm)	1	ERROR, check agains
22	Number of ports (equal sizes)	1	*1
23	Opening angle	180,0	°
24	Port height	0,00	mm
25	Port top dist.from tdc	40,00	mm
26	Angle when open (duration)	0,0	°

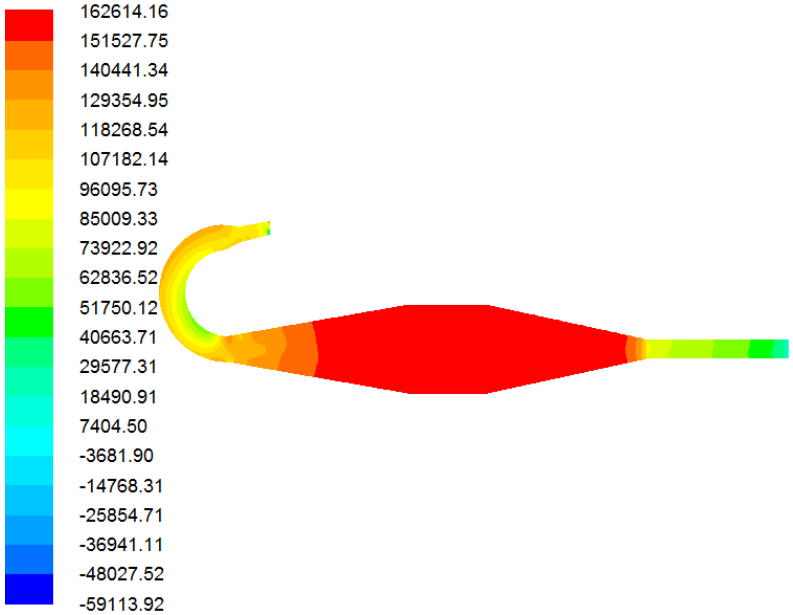
Выхлопная система 2В350

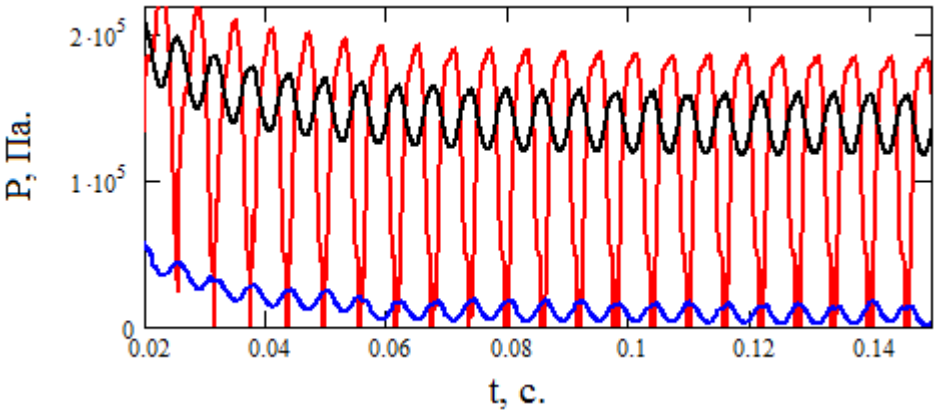


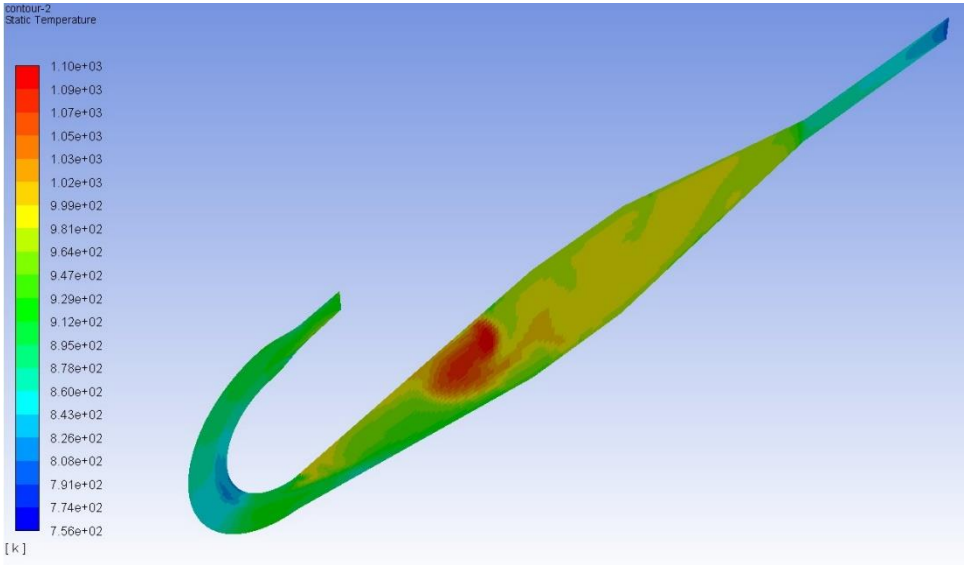
Элементы выхлопной системы 2В350

3-мерная постановка акустических задач

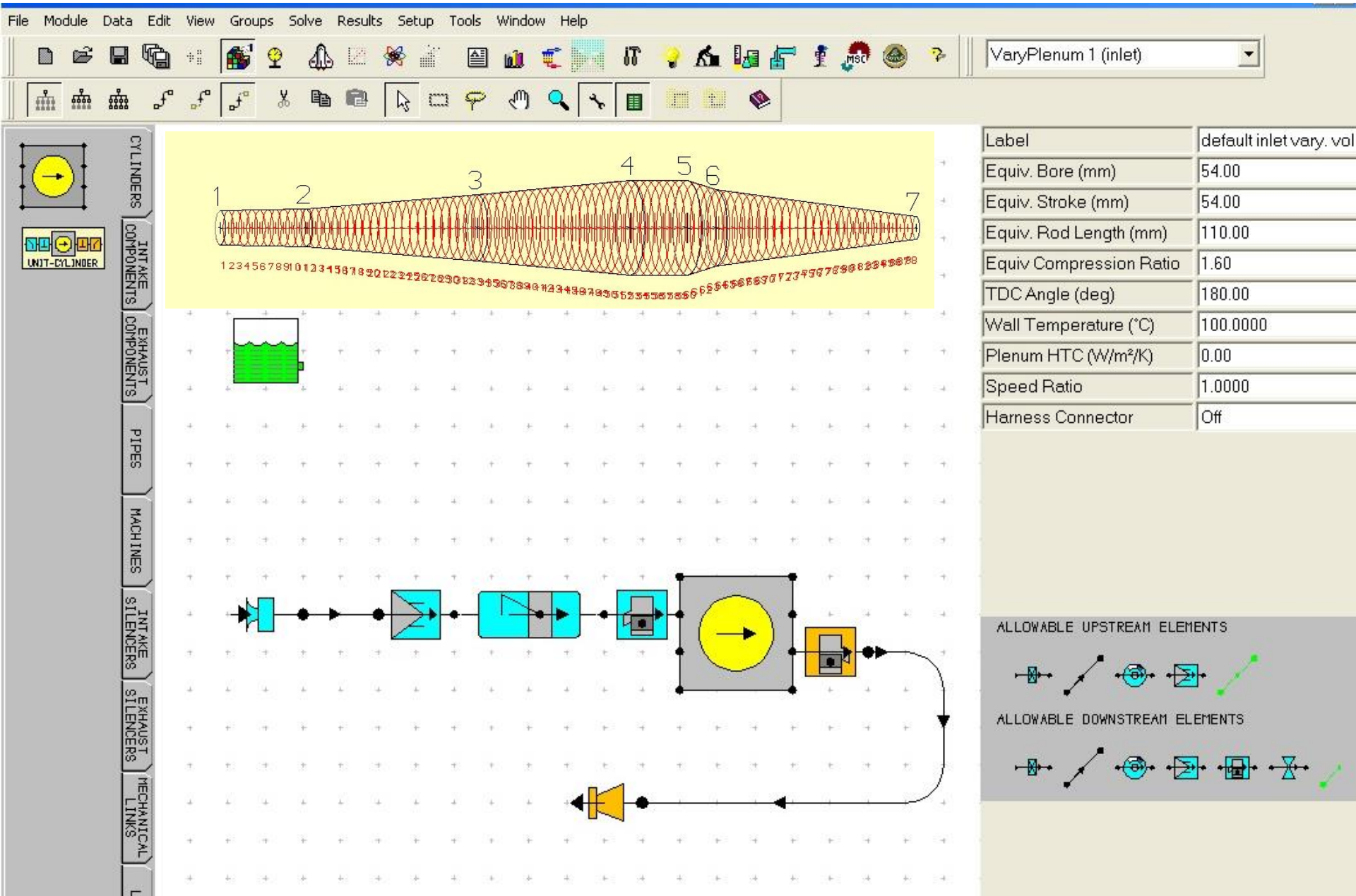






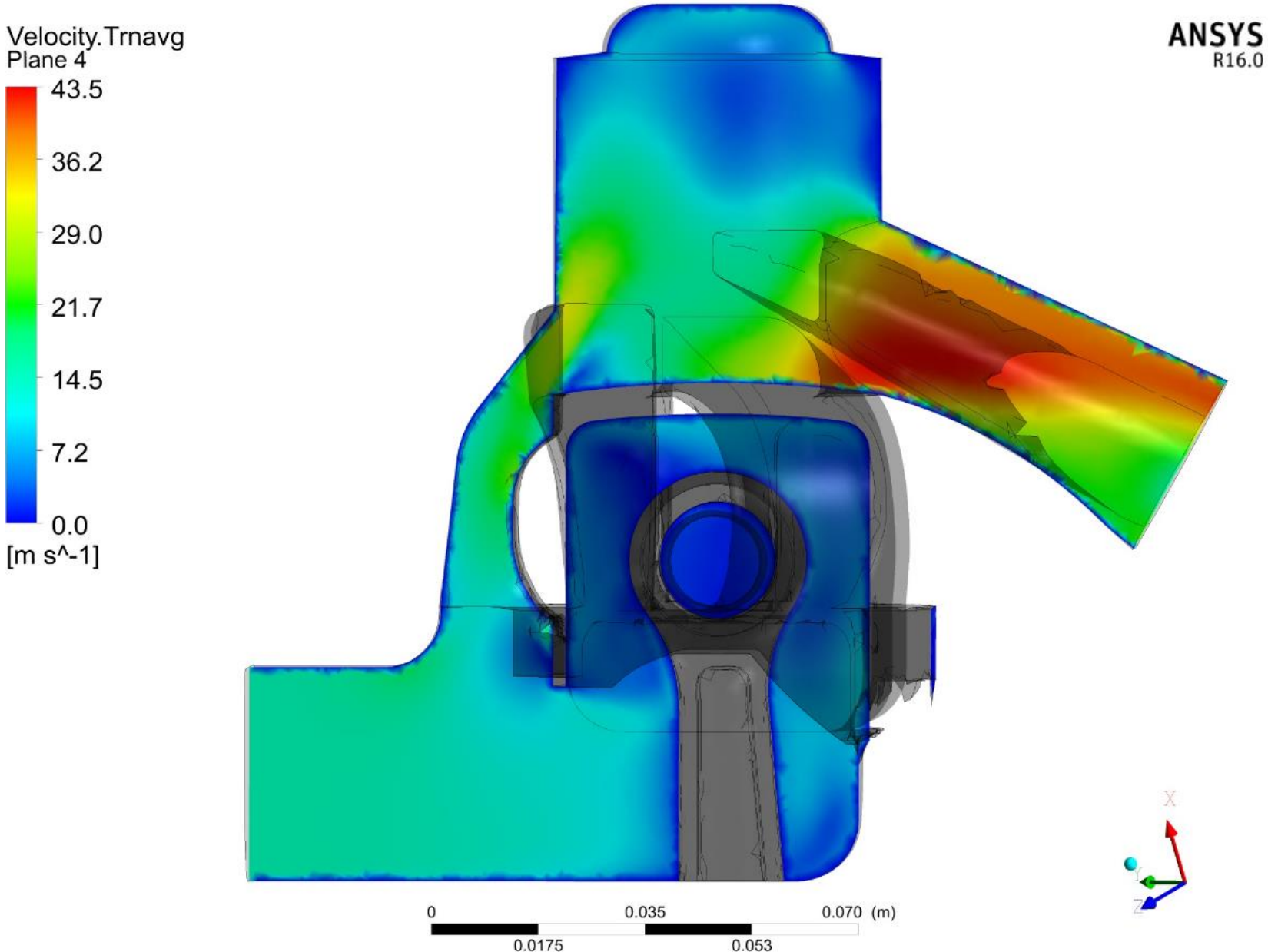


Одномерный анализ

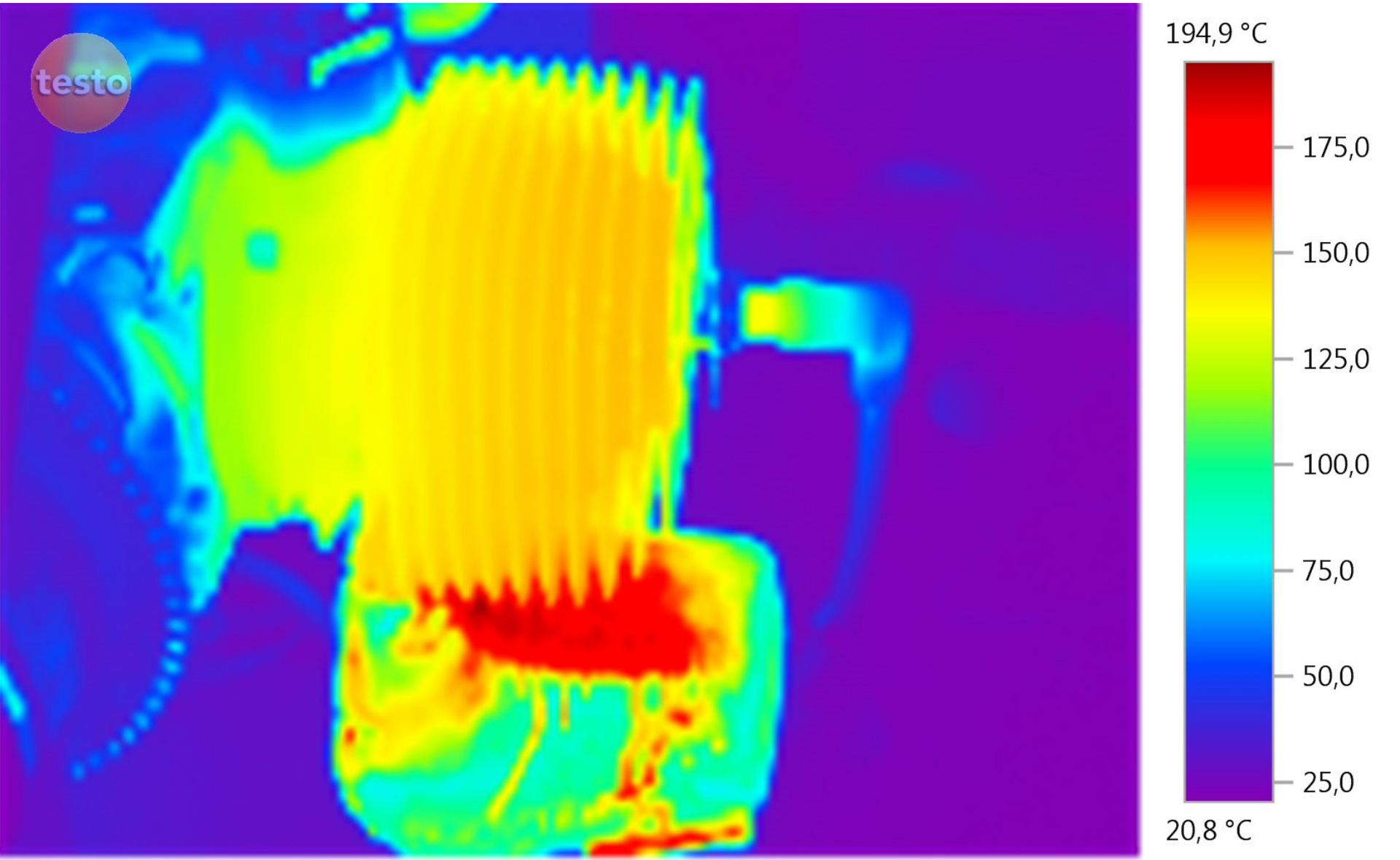


Современные выхлопные системы БПЛА

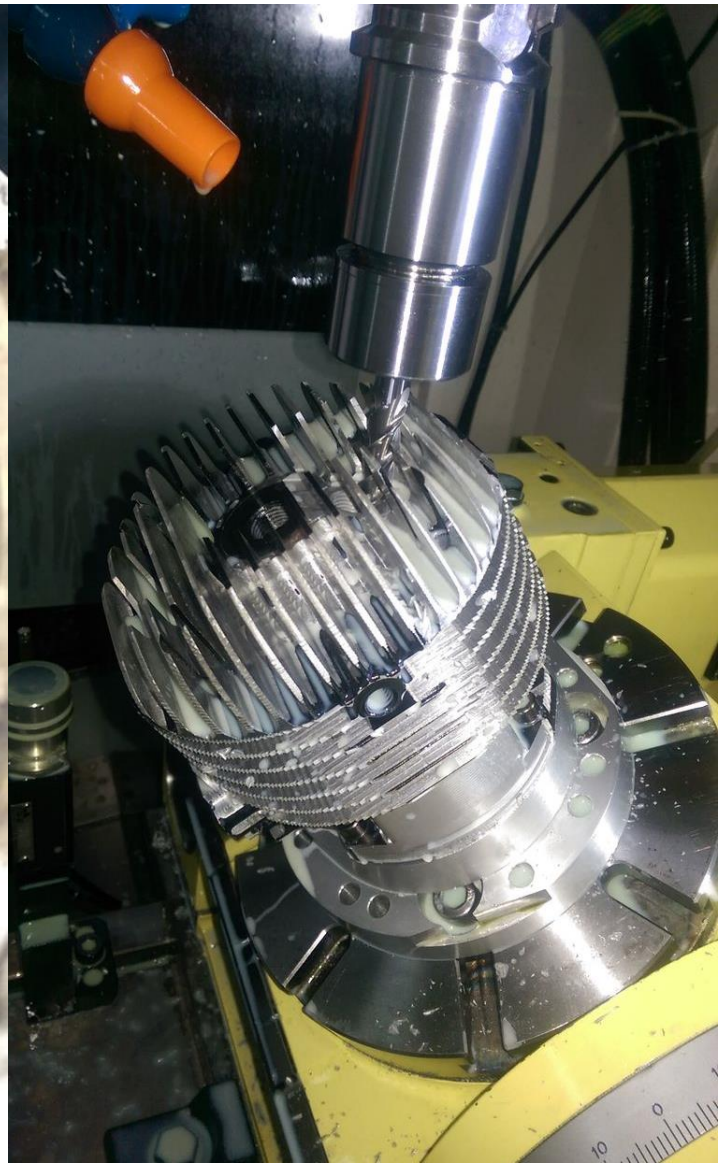
Анализ газодинамических процессов в ДВС. 3-мерный анализ с упрощённой моделью картера.



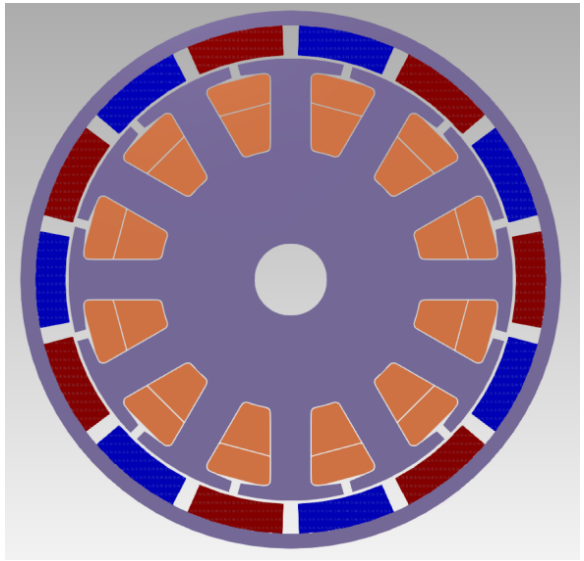
Расчёт систем охлаждения, термограммы

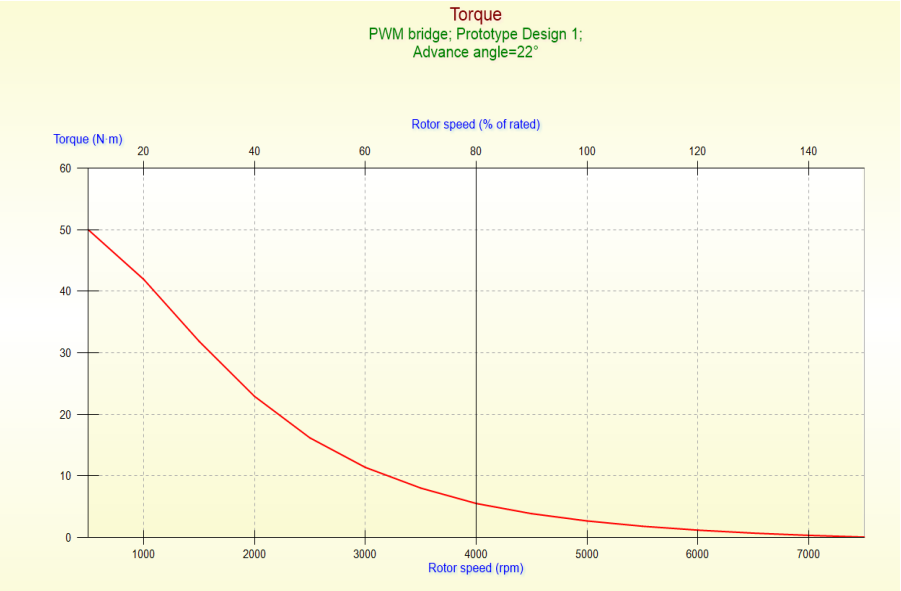


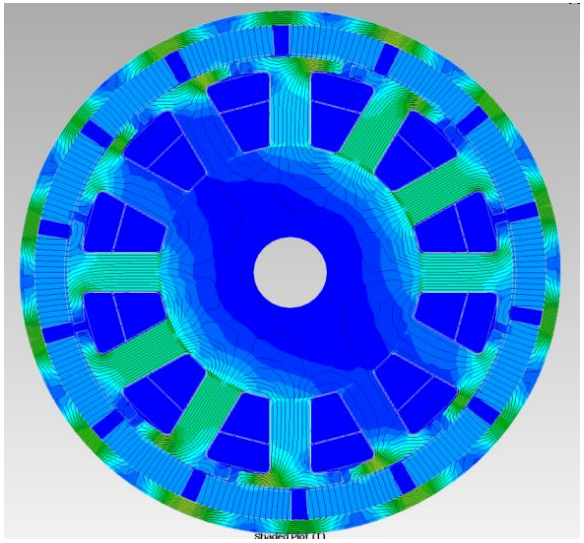
Каналы, адаптированные под ЧПУ производство и процесс изготовления на 5-осном фрезерном станке



Проектирование электрических машин

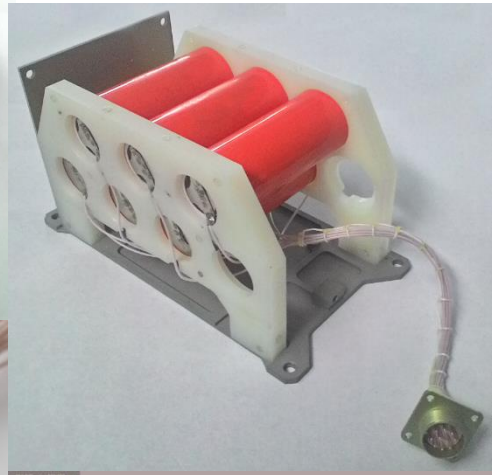


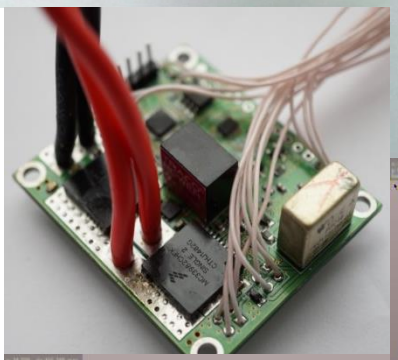


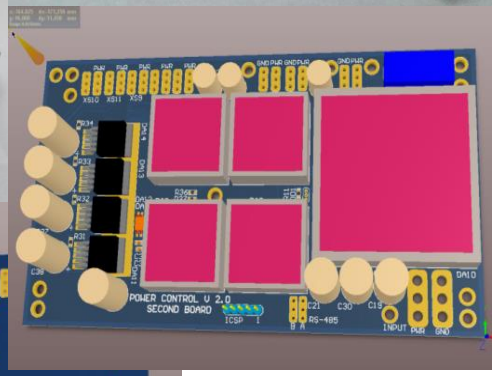


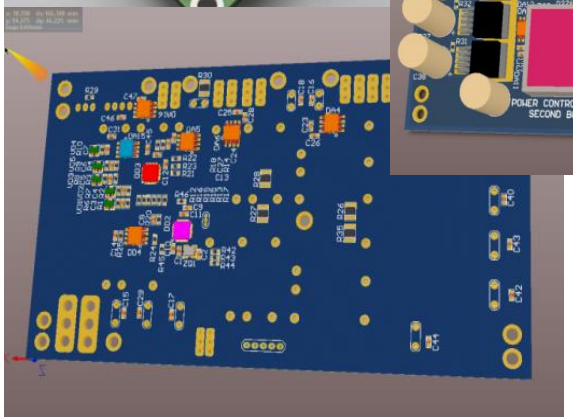
Силовая электроника и аккумуляторные батареи

- Опыт в создании вторичных источников питания мощностью до 2 кВт
- Опыт в создании устройств коммутации и балансировки батарей
- Опыт в интеграции аккумуляторных батарей в сборки



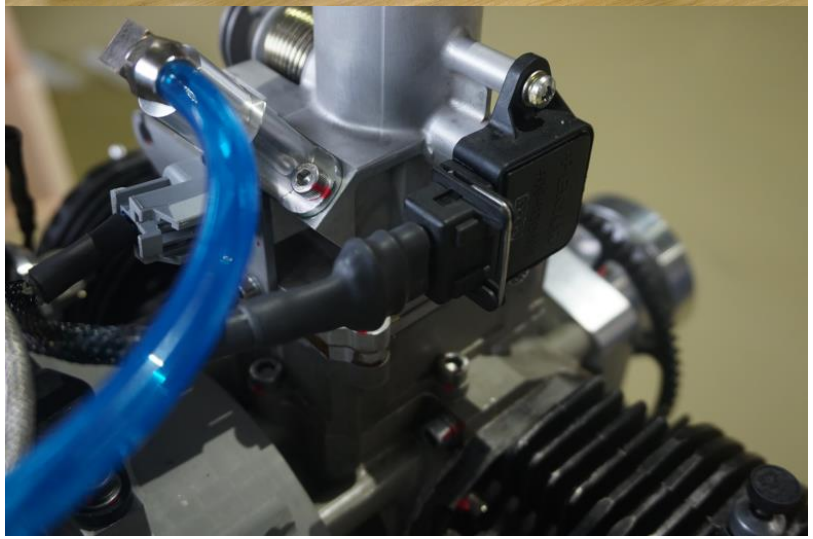






Технологии впрыска топлива

Основные особенности электронных блоков управления КДВС-03 и КДВС-04



- Высотная коррекция
- Учет температур атмосферы, головки цилиндра, выхлопных газов
- Возможность подключения широкополосного лямбда зонда
- Компенсация изменения напряжения питания
- Компенсация отклонения давления топлива от номинального
- Самодиагностика системы, автоматизированное ведение статистики, запись телеметрии
- Выдача на внешние системы телеметрии
- Питание устройства от 10 до 30В
- Масса устройства в металлическим корпусе менее 100 гр.

Спасибо за внимание

Крылов Егор Дмитриевич
E-mail: krylov@uav-siberia.com
Тел:+7-913-044-41-32

Рутковский Валерий Олегович
E-mail: jbiplane@gmail.com

АВИАМЕХАНИКА
Научно-производственное предприятие

Автономные аэрокосмические системы

ПРОГНОЗГЕОФИЗИКА