

Состояние разработок по созданию системы «термоакустический двигатель - линейный генератор»

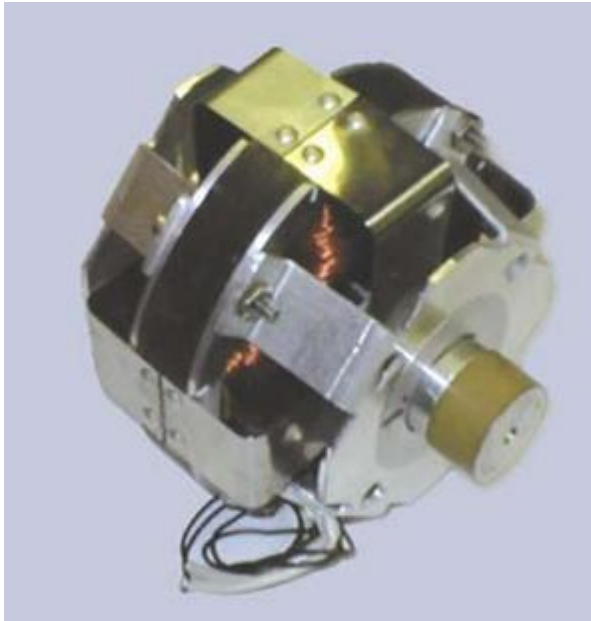
В последнее десятилетие достаточно активно развиваются исследовательские работы по созданию электромеханических систем на основе термоакустических двигателей и линейных электрических генераторов при решении задач разработки принципиально новых СЭП для КА и установок для сжижения и разделения газов на основе термоакустического эффекта.

Имеются сведения о разработке в США фирмой Northrop Grumman Space and Technology, Space & Electronics Group (One Space Park, Redondo Beach, CA 90278) при поддержке Los Alamos National Laboratory, Condensed Matter and Thermal Physics (MST-10, MS-K764, Los Alamos, NM 87545) в рамках контракта NAS3-01103 CDRL 3f с NASA опытного образца термоакустического двигателя - линейного генератора космического назначения. Генератор имеет электрическую мощность 116 Вт постоянного тока при общей массе 13.9 кг, т.е. начальную удельную мощность 8.3 Вт/кг. При тепловой мощности изотопного источника 500 Вт суммарный КПД генератора составляет 23% .

Конструкция термоакустического двигателя с номинальной акустической мощностью 143 Вт фирмы Northrop Grumman Space and Technology



Конструкция термоакустического двигателя с номинальной акустической мощностью 143 Вт фирмы Northrop Grumman Space and Technology



Энергетические показатели и перспективы разработки

КПД собственно термоакустического двигателя, преобразующего тепло изотопного плутониевого источника в энергию акустических колебаний удовлетворителен и составляет 30% . Для систем СЭП КА большей мощности следует ожидать увеличения КПД термоакустического двигателя и, следовательно, системы «термоакустический двигатель – линейный генератор» (ТАД – ЛГ) в целом.

Успех опытного образца термоакустического генератора космического назначения определил активизацию зарубежных работ по созданию систем СЭП для КА на основе термоакустического эффекта.

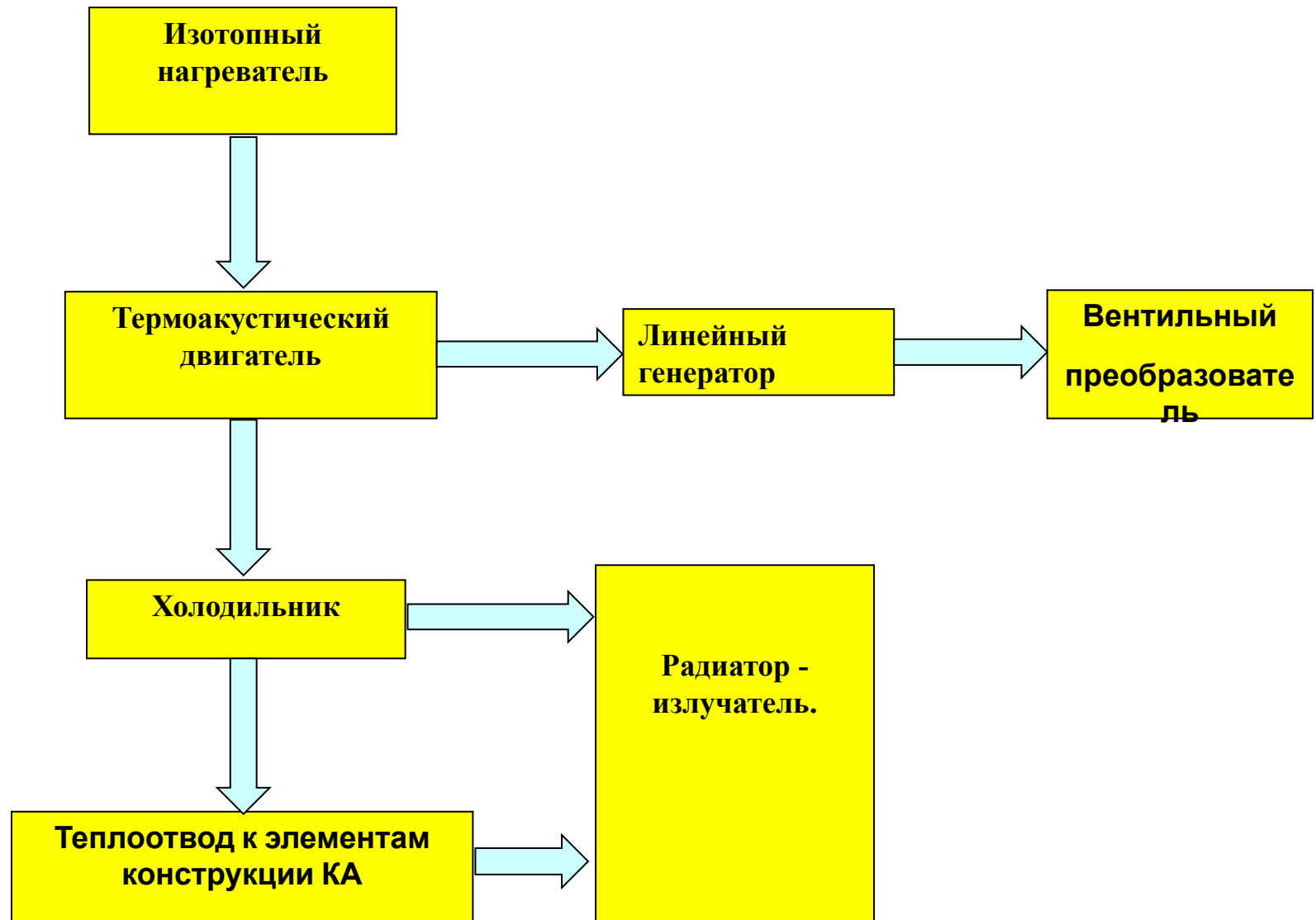
В данном докладе представлены исследования по определению возможных технических

Структура системы ТАД -ЛГ

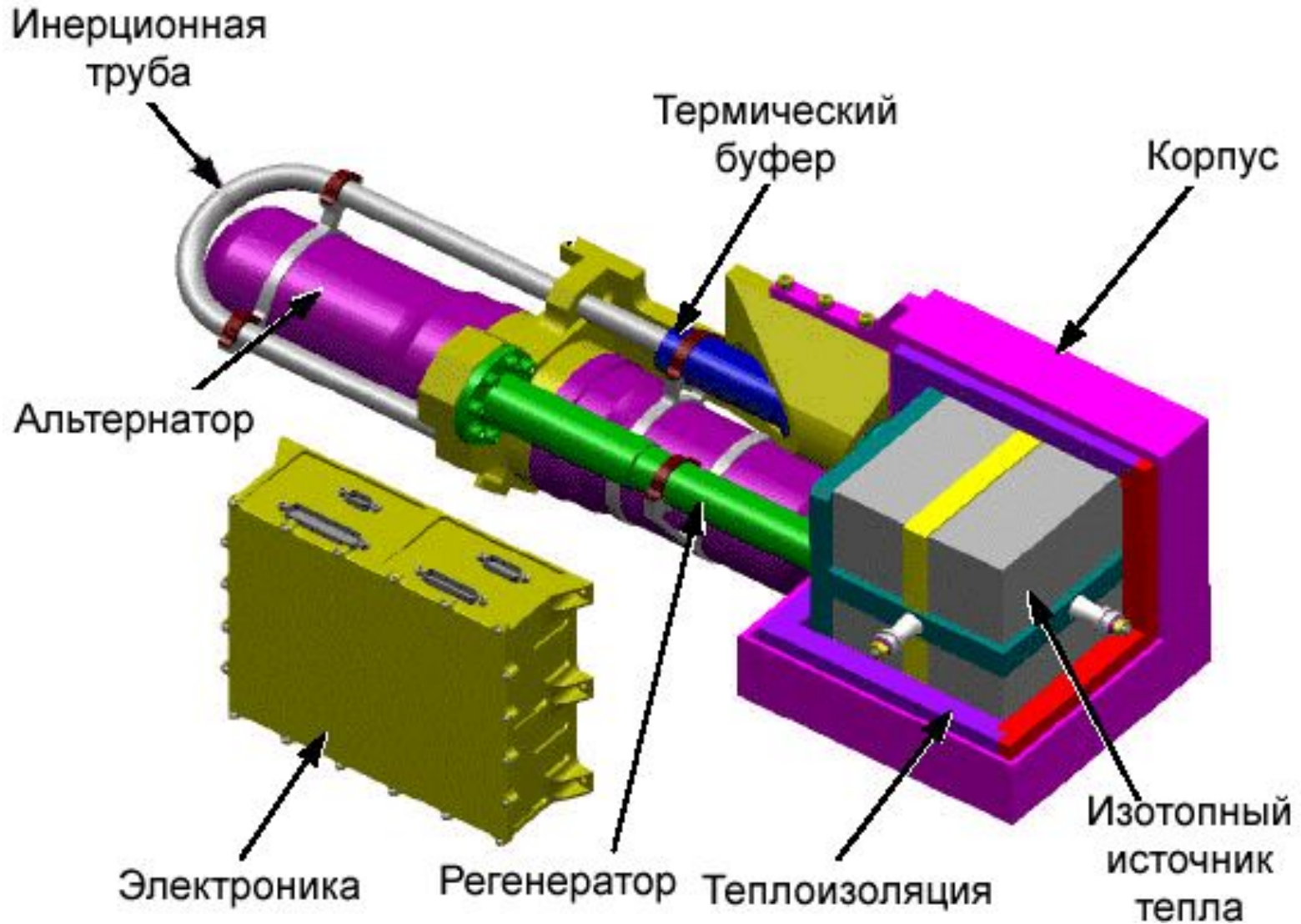
Система «термоакустический двигатель - электрический генератор» для КА состоит из следующих структурных единиц:

- источника тепловой энергии (изотопного нагревателя);
- термоакустического двигателя, преобразующего тепло в энергию акустических колебаний;
- холодильника-излучателя.
- преобразователя энергии акустических волн в электрическую энергию (альтернатора - линейного генератора переменного тока);
- вентильного преобразователя переменного тока в постоянный.

Структурная схема ТАД - ЛГ



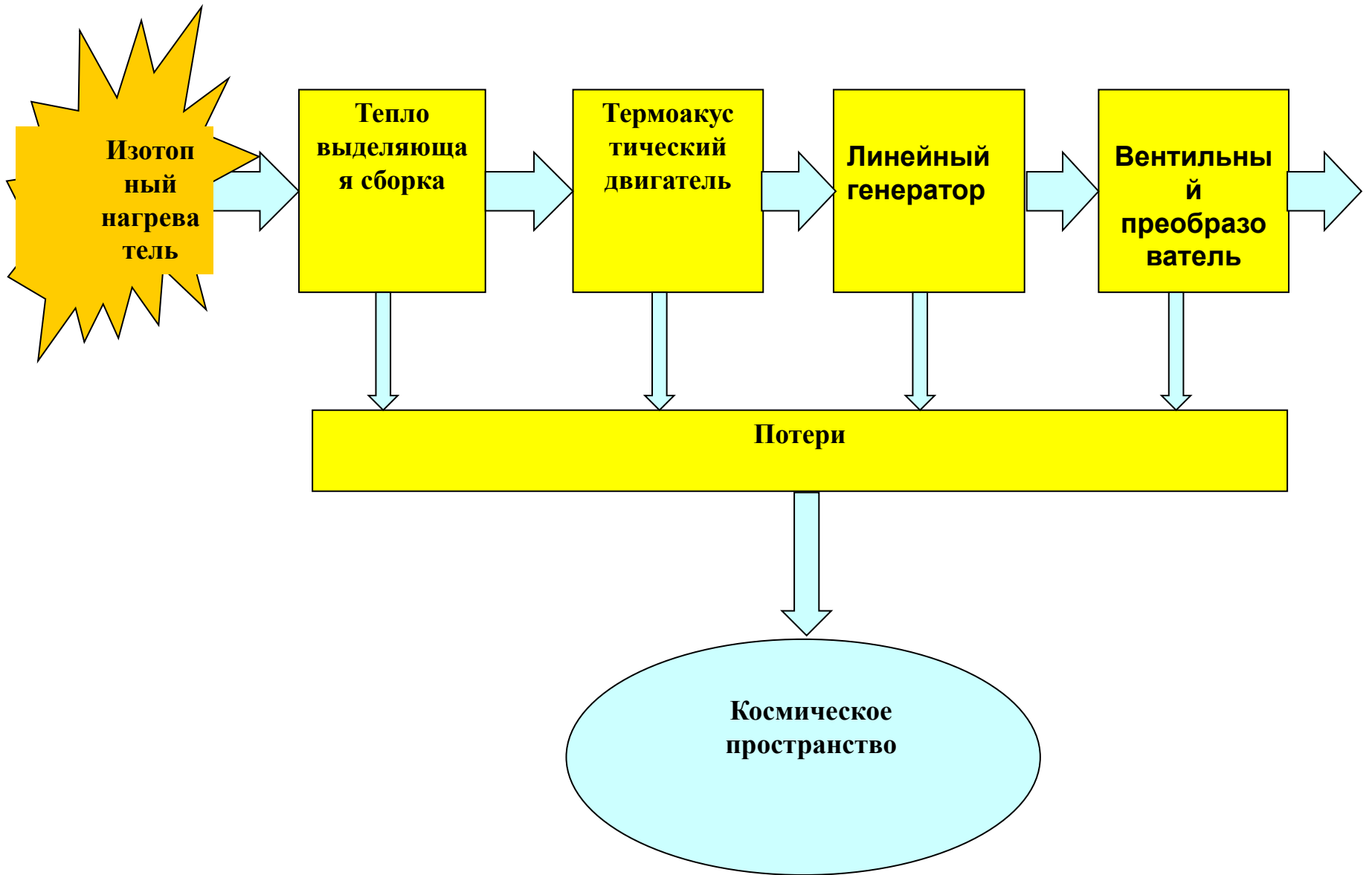
Типичная компоновка термоакустического двигателя и линейного генератора (альтернатора)



Теплообмен в ТАД-ЛГ

Термические интерфейсы для подвода и отвода тепла:

- термический интерфейс тепловыделяющей сборки с горячим теплообменником термоакустического двигателя**
- термический интерфейс горячего теплообменника термоакустического двигателя с тепловыделяющей сборкой**
- термический интерфейс холодного теплообменника термоакустического двигателя с радиатором**
- термический интерфейс холодного теплообменника термоакустического двигателя с элементами конструкции КА. Для ТАД - ЛГ значительной мощности в качестве холодильника - излучателя необходимо использовать радиатор, излучающий отработанное тепло в космос.**



Компоновка линейного генератора

Линейный генератор (ЛГ) переменного тока преобразует энергию акустических волн в электрическую энергию. Он имеет поршень, который без смазки движется в цилиндре, соединенном с акустической системой ТАД.

Зазор между поршнем и цилиндром составляет 15-30 мкм. Для поддержания такого малого зазора используют подвеску ротора поршня на двух мембранных пружинах.

Для компенсации вибраций при компоновке системы используется два оппозитных ЛГ, имеющих общий акустический интерфейс с акустической системой ТАД.

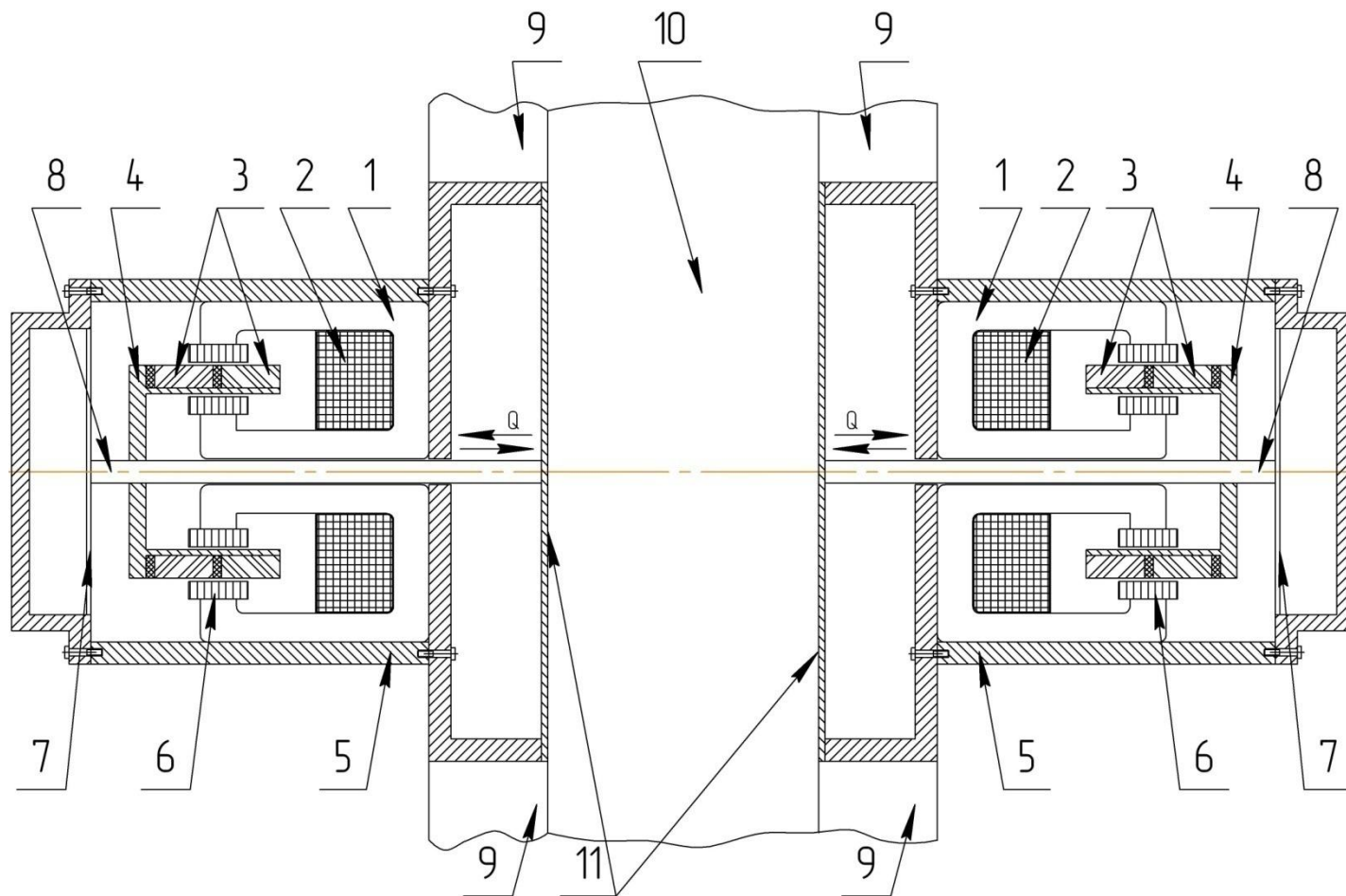
С поршнем соединен подвижный элемент, на котором расположена магнитная система линейного генератора переменного тока.

Для ЛГ мощностью до нескольких киловатт в качестве магнитной системы используются постоянные магниты (ЛГПМ).

На неподвижном статоре генератора расположена неподвижная магнитная система (магнитопровод и обмотки) линейного генератора.

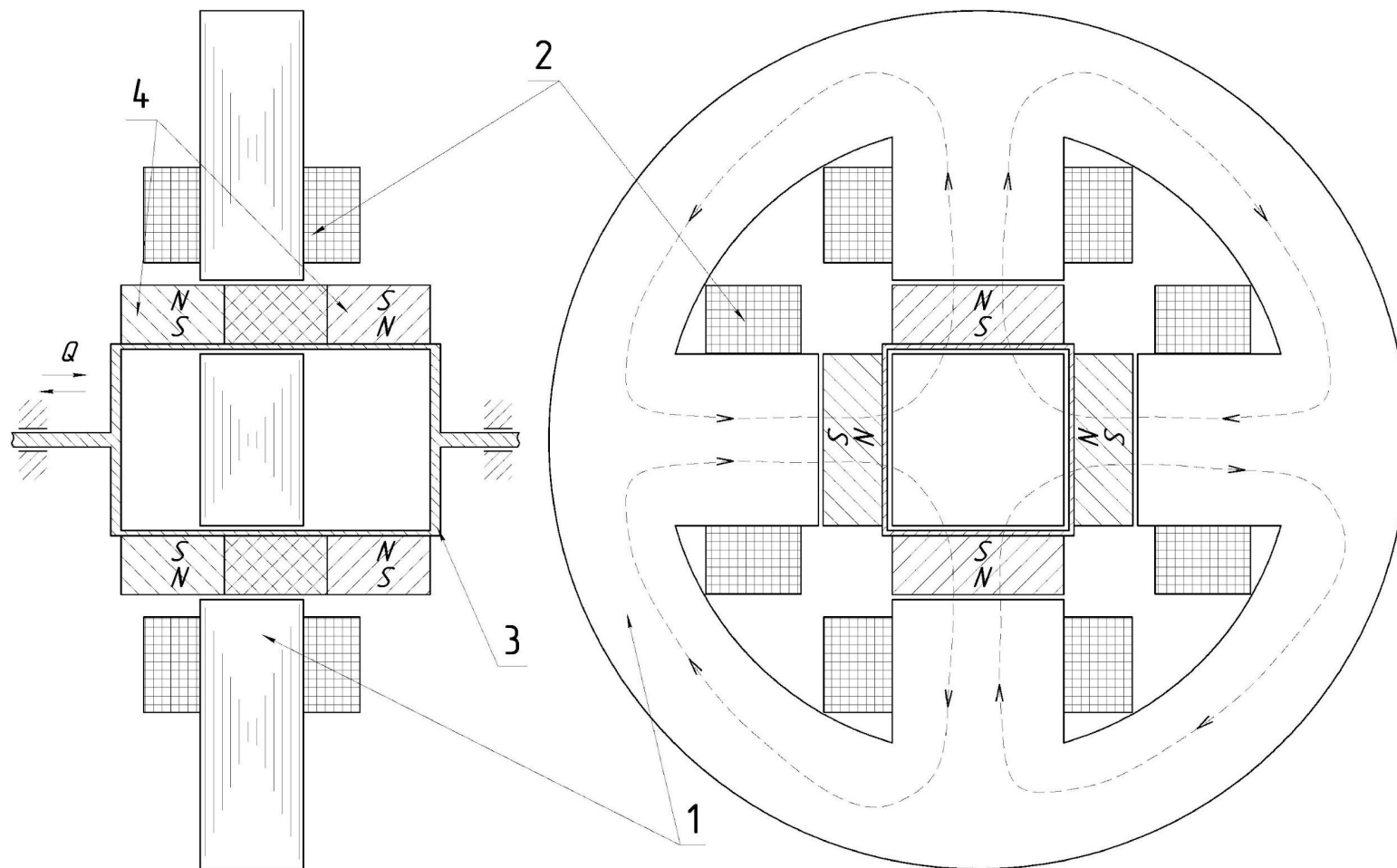
Зазор в магнитной системе поддерживается с помощью подвески подвижного элемента на мембранных пружинах.

Конструкция оппозитного ТАД – ЛГПМ



**1,6 – магнитопровод, 2 - обмотка, 3 – постоянные магниты,
4 – индуктор, 5 – корпус ЛГПМ, 7,9 – мембрана, 8 – шток,
9 – холодильник-излучатель,10 – термоакустический двигатель.**

Вариант конструкции ЛГПМ



1 – магнитопровод, 2 – обмотка, 3 – подвижная часть (индуктор), 4 – постоянный магнит

В качестве одного из конструктивных вариантов может быть предложена магнитная система, изображенная на слайде

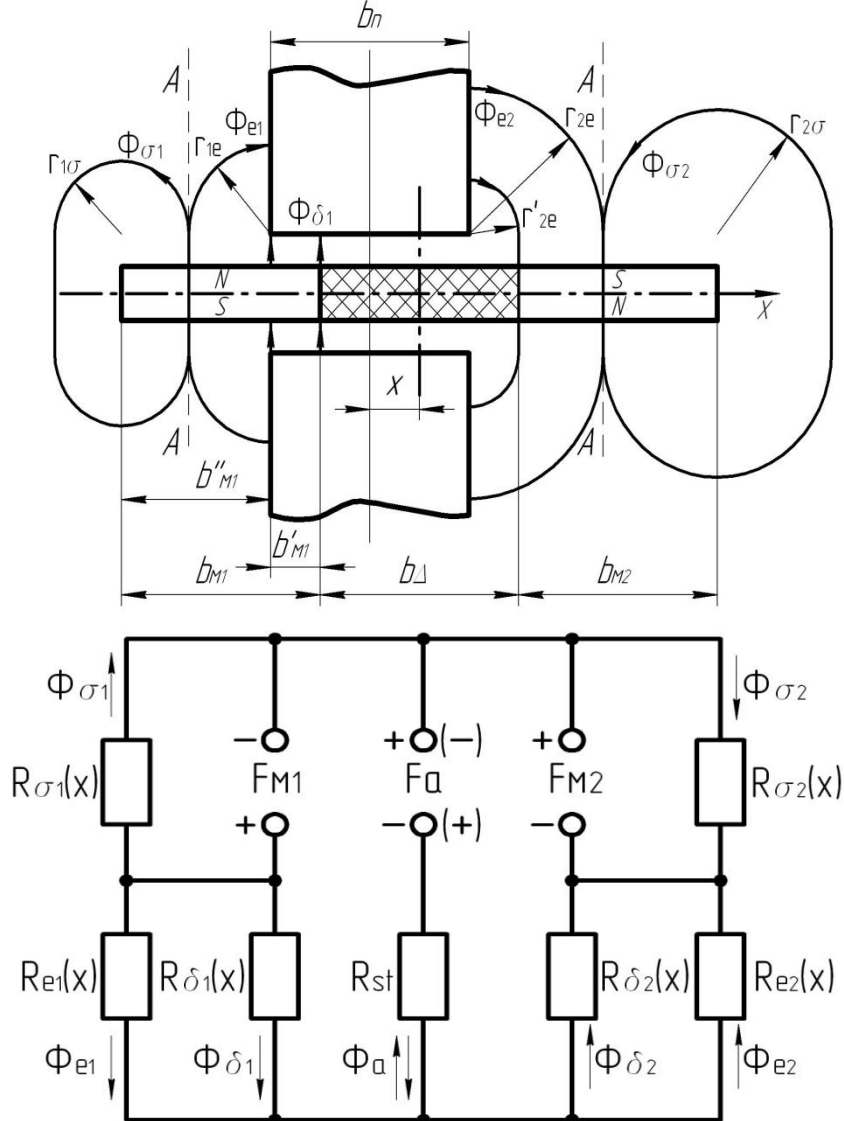
Для данной конструкции магнитопровод ЛГПМ состоит из двух частей: внешней – выполненной в виде пакета круглых штампованных пластин с четырьмя полюсами, и внутренней – представляющей собой также пакет шихтованных пластин, размещенных с внутренней стороны индуктора.

Подвижная часть состоит из полого каркаса из немагнитного материала и восьми призматических магнитов, размещенных на нем. Немагнитный промежуток обеспечивается специальной вставкой.

Преимуществом данной конструкции является ее технологичность и достаточно высокое использование материалов. Обмотка, выполненная в виде сосредоточенных катушек, размещена на полюсах магнитопровода. Магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, суммируется и проходит через полюса магнитопровода, меняя свое направление в зависимости от положения индуктора.

Картина распределения магнитного поля ЛГПМ

Распределение магнитных потоков. Эквивалентная схема магнитной цепи ЛГПМ



Независимо от положения индуктора
в системе существуют магнитные
потоки

трех видов:

1. Потоки рабочего зазора
2. Потоки краевого эффекта
3. Потоки рассеяния

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_a$$

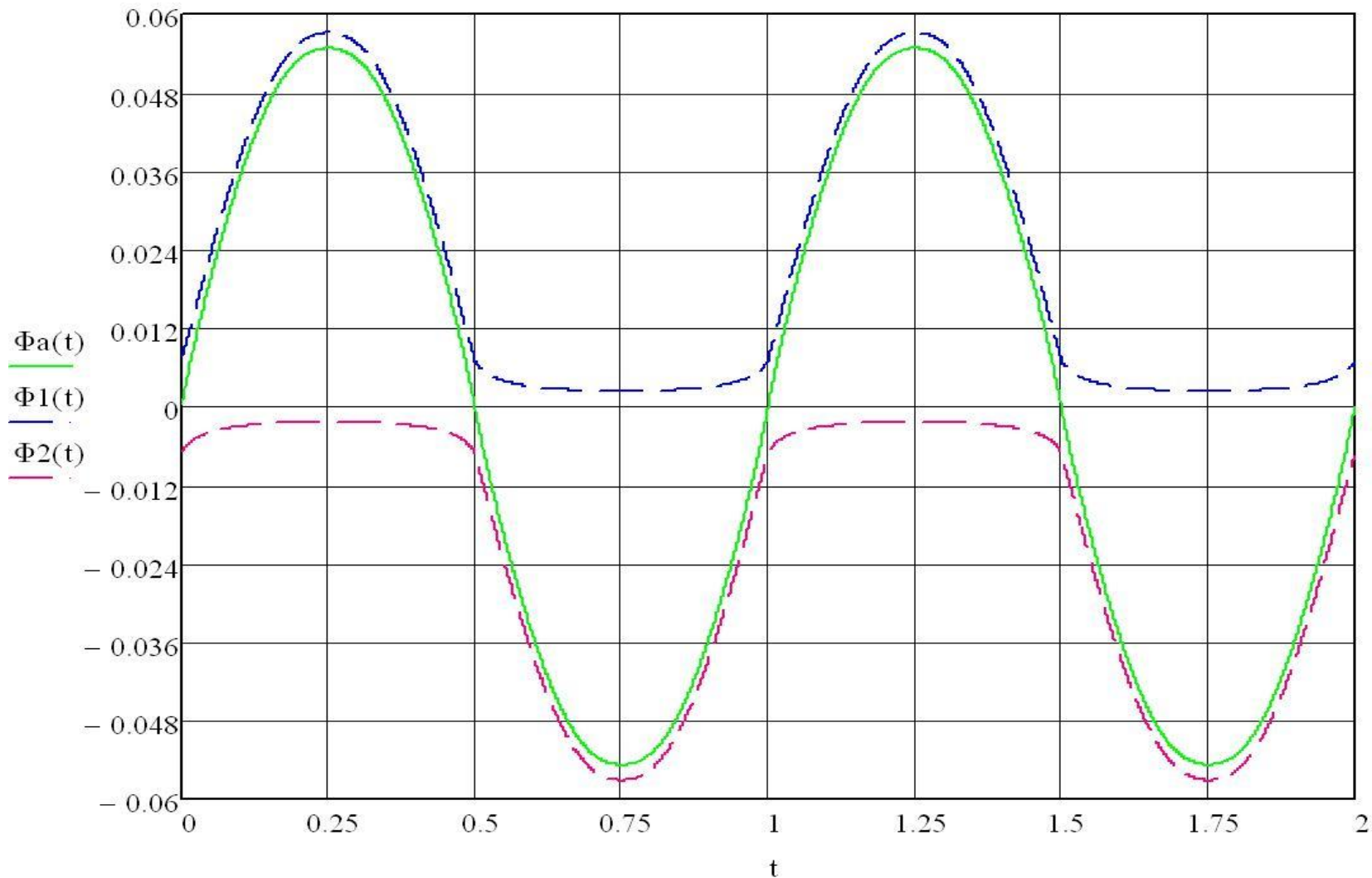
$$F_{M1} + F_{M2} = \Phi_1 [R_1(x) + R_{st}] + \Phi_2 [R_2(x) + R_{st}]$$

$$F_{M1} \pm F_a = \Phi_1 [R_1(x) + R_{st}] + \Phi_a R_{st}$$

Все перечисленные потоки
являются

функциями координаты
перемещения x , и это очень
важно с точки зрения
определения электромагнитных
сил, а также наведения ЭДС в
рабочих обмотках.

Временные диаграммы магнитных потоков ЛГ



Данные лабораторного образца

Номинальная мощность - 50 Вт, 1.5 кратная перегрузочная способность

Частота колебаний – 50 Гц

Амплитуда колебаний - $5 \cdot 10^{-3}$ м

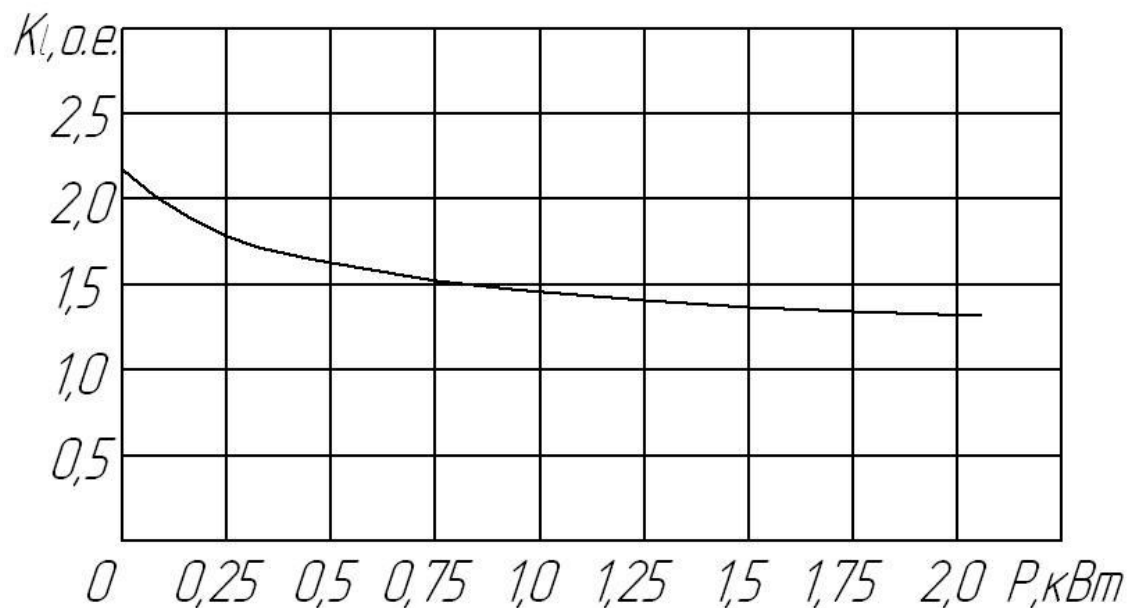
Темп| МАЕР33HsLs подвижного элемента – не более 100 °С



Кривая размагничивания магнита МАЕР33HsLs на основе NdFeB

Оценка необходимого объема постоянного магнита

Для предварительной оценки необходимого объема магнита можно использовать соотношения, разработанные для вращающихся генераторов с ПМ. Однако известные зависимости целесообразно дополнить множителем, учитывающим худшее по сравнению с вращающимися машинами использование материала ПМ



Значения поправочного коэффициента к определению объема магнита

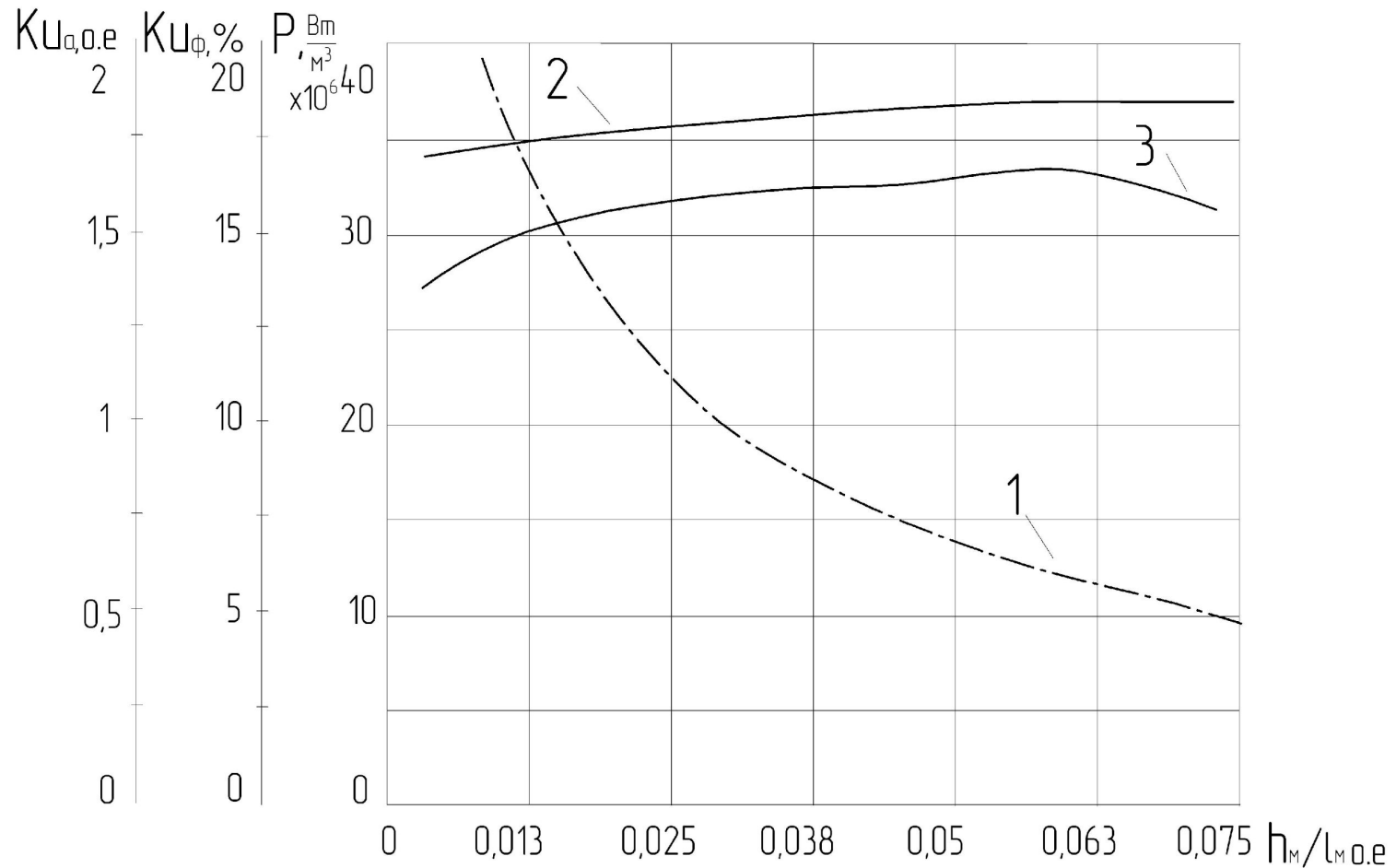
Особенности проектирования ЛГПМ

Предложенная методика применима для проектирования генераторов возвратно-поступательного движения малой (десятки ватт) и средней мощности (1-2 киловатт).

При разработке методики проектирования ЛГПМ были приняты следующие основные допущения:

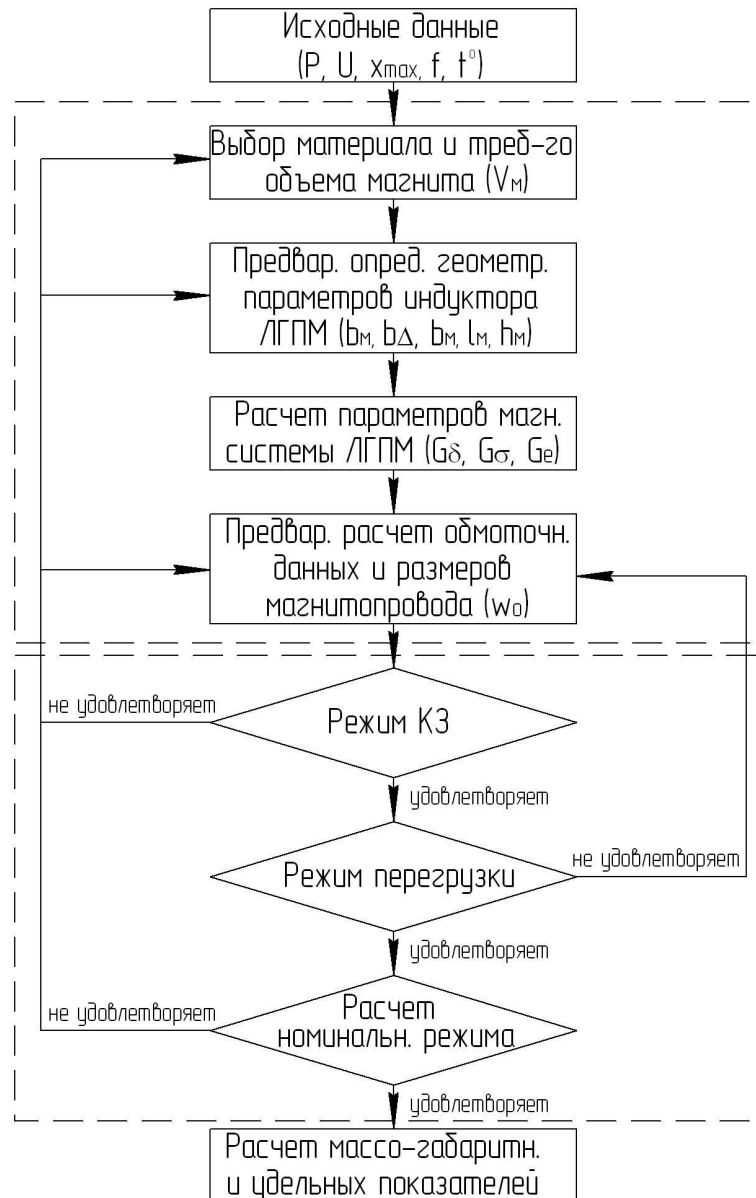
- мощность первичного двигателя много больше мощности генератора и, следовательно, амплитуда колебаний не зависит от нагрузки;
- координата положения индуктора изменяется по гармоническому закону;
- при расчете параметров магнитной цепи магнитное сопротивление стальных участков принимается равным нулю.

Особенности определения соотношений ширины магнита и немагнитного промежутка

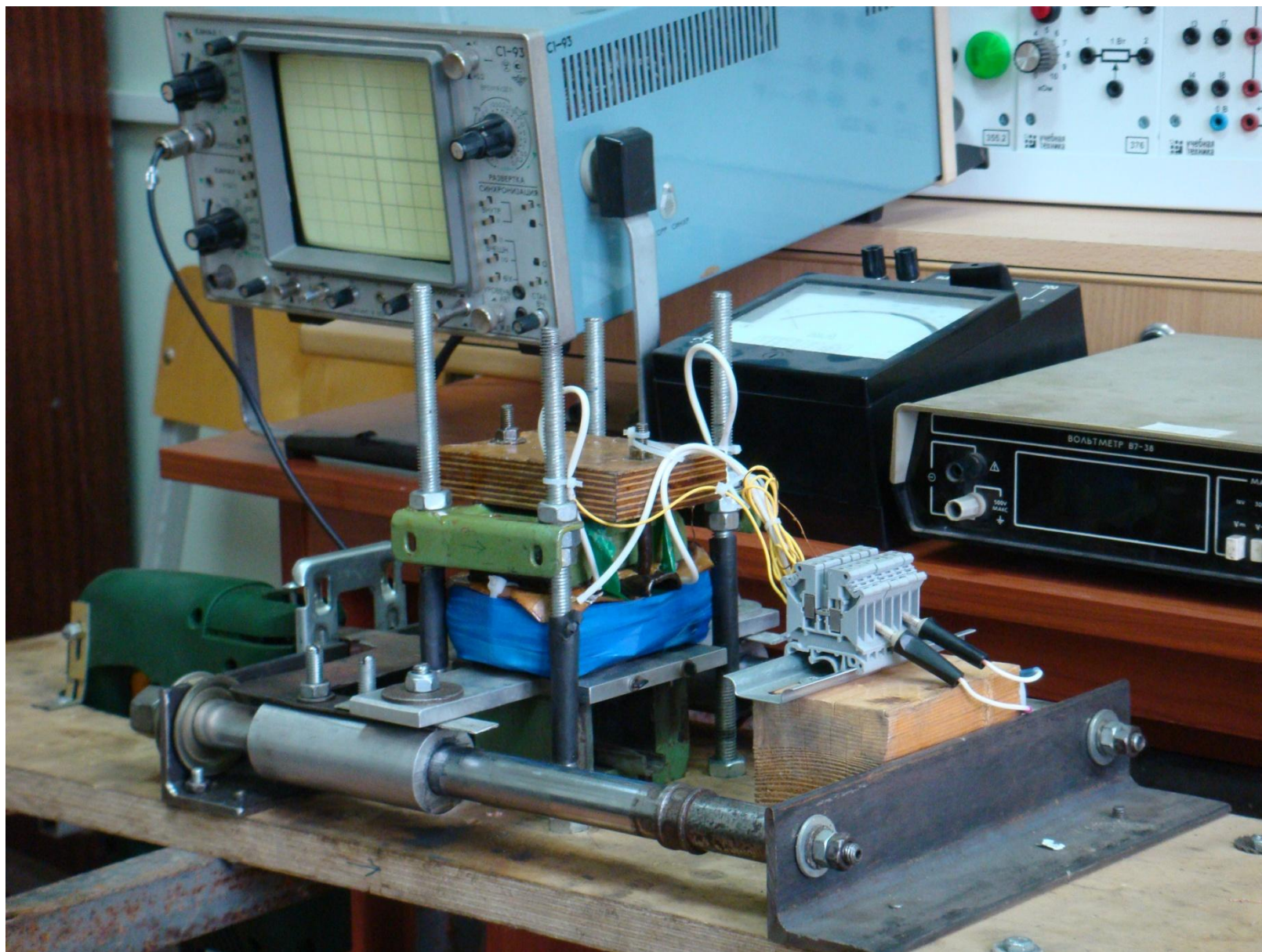


Кривая 1 – полезная мощность ЛГПМ, кривая 2 – коэффициент гармонических искажений, кривая 3 – коэффициент амплитуды

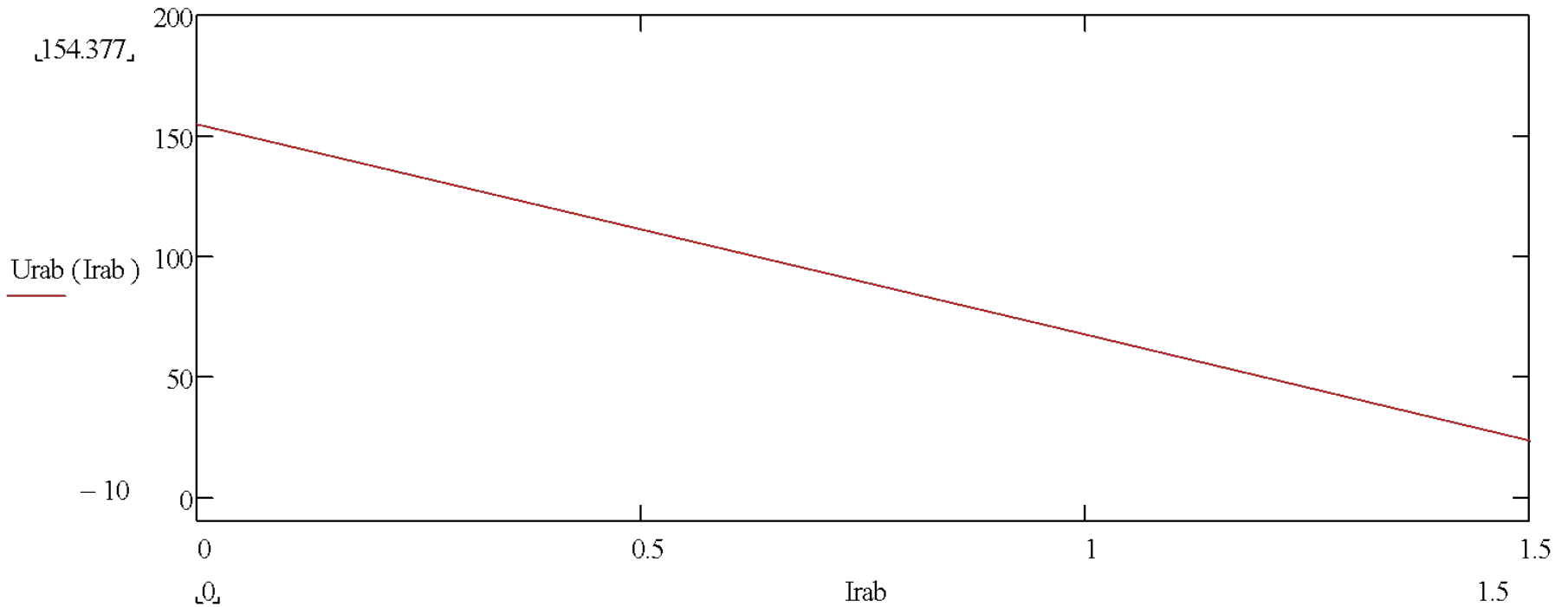
Алгоритм расчетной модели ЛГПМ



Стенд с лабораторным образцом ЛГПМ

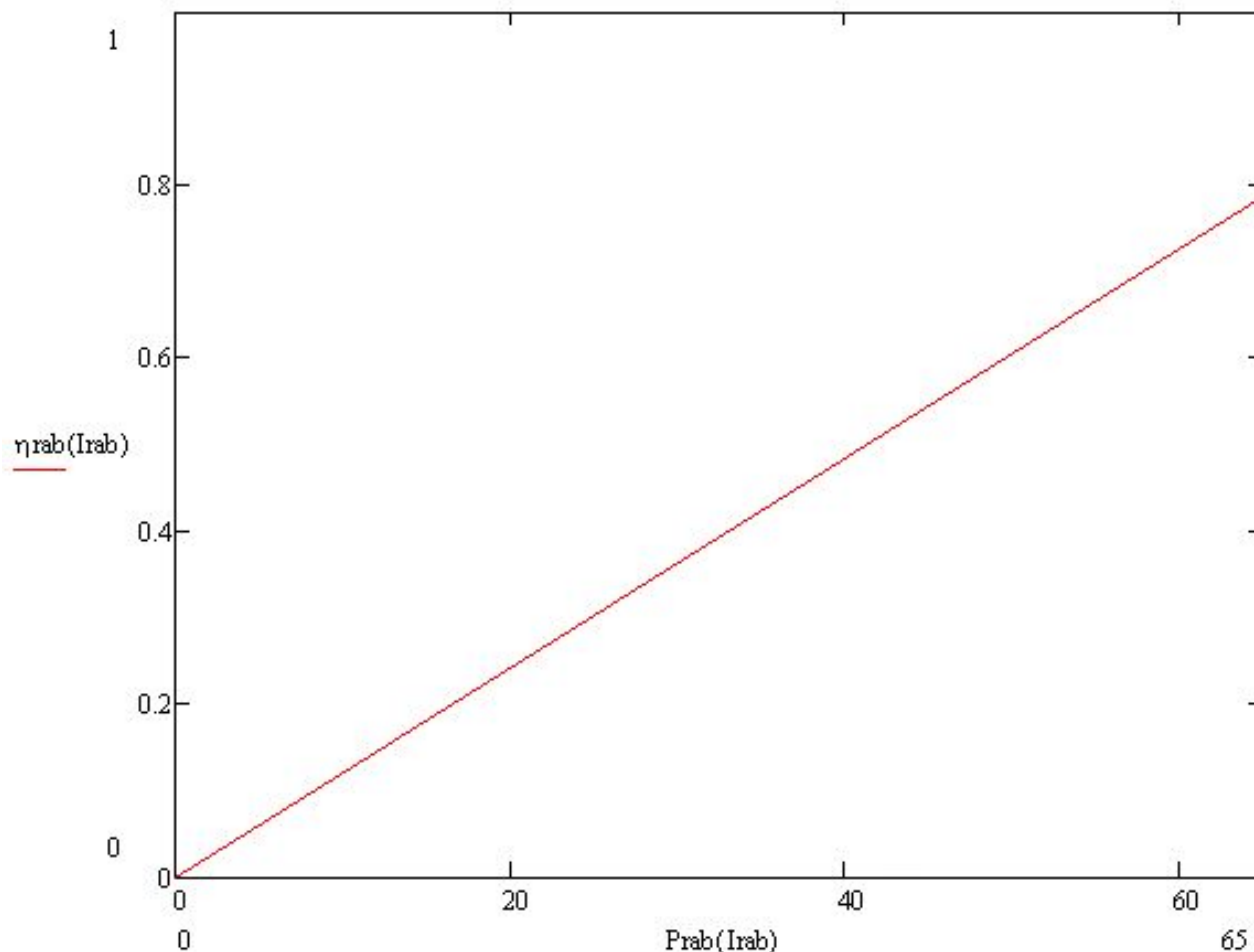


Внешняя характеристика лабораторного образца



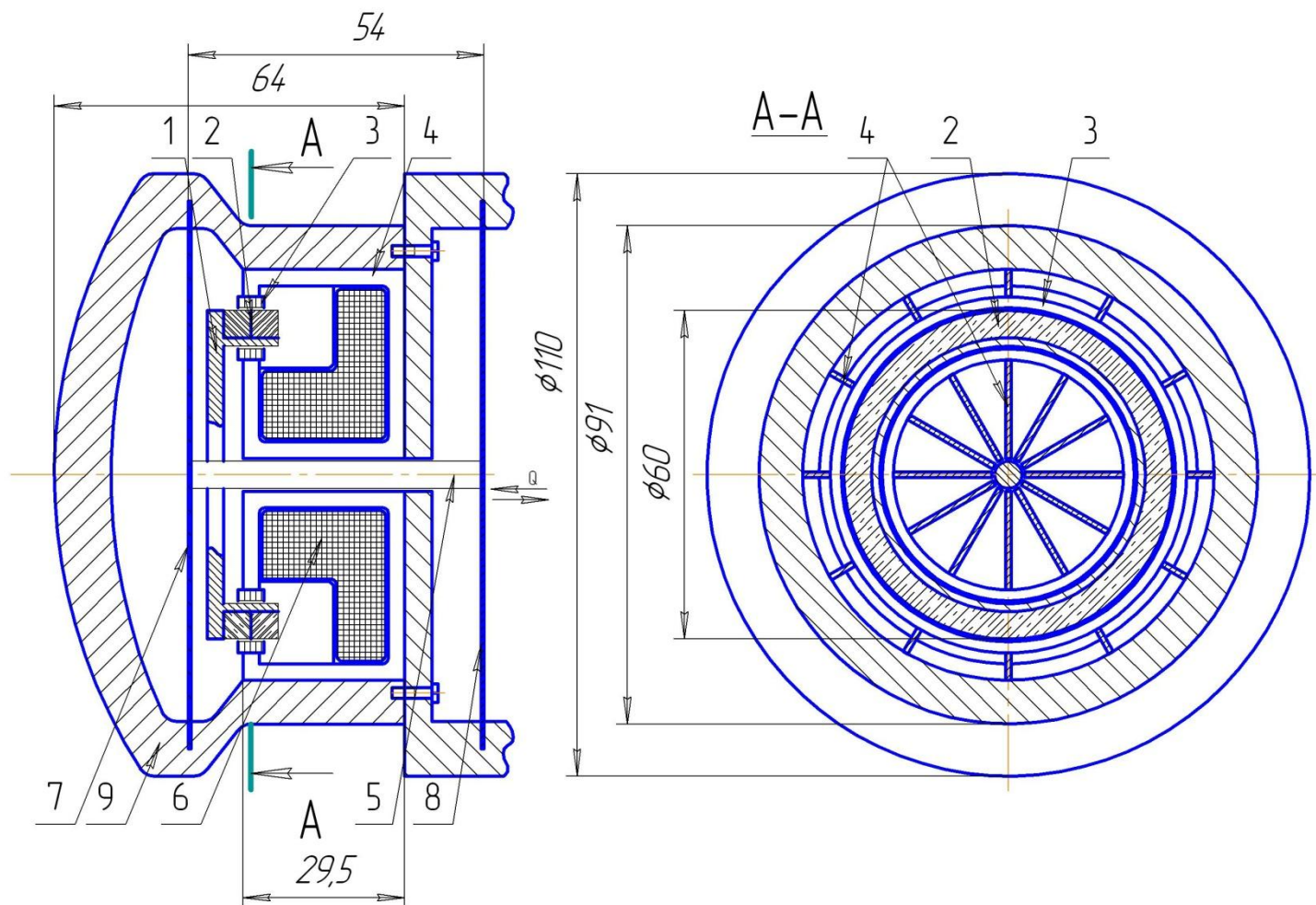
Зависимость выходного напряжения U_{rab} от тока нагрузки I_{rab}

Энергетическая характеристика лабораторного образца



Зависимость КПД η_{rab} от мощности нагрузки $P_{rab}(I_{rab})$

Конструкция лабораторного образца ЛГПМ



1 – индуктор, 2 – постоянные магниты, 3 – концентрический магнитопровод, 4 – П-образный магнитопровод, 5 – шток, 6 – обмотка, 7,8 – мембрана, 9 – задняя крышка, 10 – корпус.

Данные расчета типоразмеров ЛГПТ

Расчетная мощность, Вт	50	100	250	500	1000
Напряжение, В	63	63	63	63	63
Номинальный ток, А	0,810	1,600	3,980	7,950	15,890
КПД (без учета мех потерь), о.е.	0,786	0,820	0,849	0,864	0,873
Диаметр магнита, м	0,014	0,026	0,066	0,132	0,260
Высота магнита, м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Ширина магнита, м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Немагнитный зазор, м	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Удельная мощность, Вт/кг	29,7	32,7	34	33,2	30,4

Выводы

- **Определена перспективная конструкция линейного генератора с постоянными магнитами для автономных электроэнергетических комплексов.**
- **Разработанная методика инженерного проектирования использована для расчета ЛГПМ различной мощности с заданными массообъемными и энергетическими показателями СЭП в составе автономного объекта.**
- **Предложены рекомендации по проектированию ЛГПМ**