



**REENCON-XXI**



# **ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ МИКРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**



**д.т.н., проф. Ефимов Николай Николаевич,  
докладчик Безуглов Роман Владимирович**

Главный научный сотрудник ООО НПП «Донские технологии»

346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Михайловская, 164

Тел./факс (8635)22-76-06

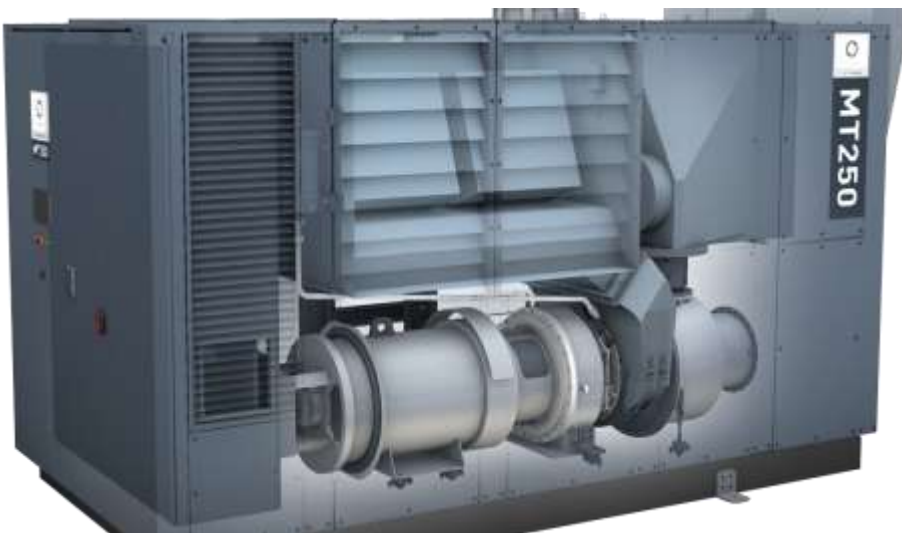
email: v\_parshukov@mail.ru, web site : [www.don-tech.ru](http://www.don-tech.ru)



## Актуальность исследования



В настоящее время в мире активно внедряются установки малой децентрализованной энергетики мощностью до 1-5 МВт. Современная распределенная децентрализованная энергетика базируется на использовании газопоршневых, газотурбинных и паротурбинных установок, а также на применении ВИЭ. Конструкция большинства микротурбин имеет горизонтальное исполнение. Следует отметить, что исследований динамических режимов вертикальных турбинных установок проводилось несоизмеримо меньше, в сравнении с установками горизонтального исполнения. Вертикальные турбомашин требуют особого подхода к проектированию, при котором необходимо учитывать особенности пусковых моментов трения, во избежание нехватки номинальной мощности для сдвига с места роторной части агрегата.





## Цель:

Разработка методики расчета динамических характеристик элементов вертикальных микротурбин на различных типах подшипников в переменных и номинальных режимах.

## Задачи:

1. Анализ основных конструктивных особенностей элементов вертикальной паровой микротурбины.
2. Разработка математической модели работы турбогенератор и конденсатора микротурбины в различных режимах.
3. Разработка математической модели работы конденсатора микротурбины на переменных режимах.
4. Разработка имитационной модели работы турбогенератора и конденсатора микротурбины.
5. Модернизация ПТС испытательного стенда и проведение экспериментальных исследований микротурбины.
6. Разработка технических решений и рекомендаций по пускоостановочным режимам микротурбинных установок с использованием их динамических характеристик.



## Существующие микротурбины

В настоящее время в мировой практике для индивидуального энергоснабжения используются когенерационные микроэнергетические установки, обеспечивающие индивидуальных потребителей электрической и тепловой энергией. При анализе литературных источников были выбраны лучшие модели ведущих мировых производителей:

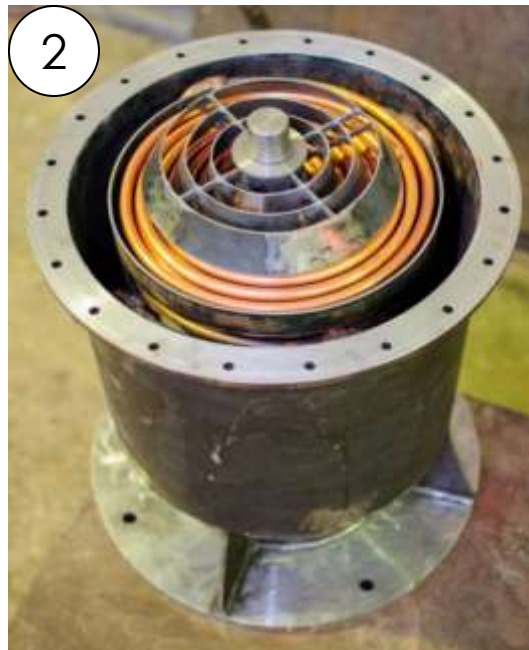
1. Газовая микротурбина Capstone C30 (США)
2. Микротурбинная энергетическая установка Elliott TA-100 (Япония)
3. Вертикальная паровая турбина ГК Турбопар (РФ)





## Вертикальная влажно-паровая микротурбина ВПМТ-30

Расчет динамических характеристик производился на примере влажно-паровой микротурбины ВПМТ-30 (патенты №№ 99541, 133912, 134239, 134240, 2522633) состоящей из турбогенератора (1) и конденсатора (2).



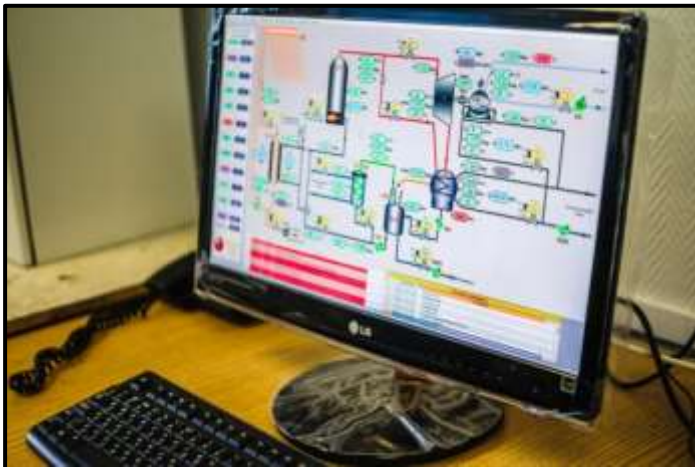
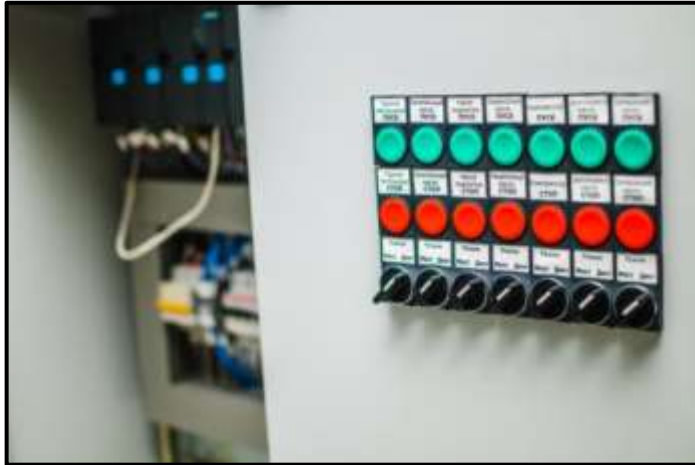


## Вертикальная влажно-паровая микротурбина ВПМТ-30





## Внешний вид блока управления

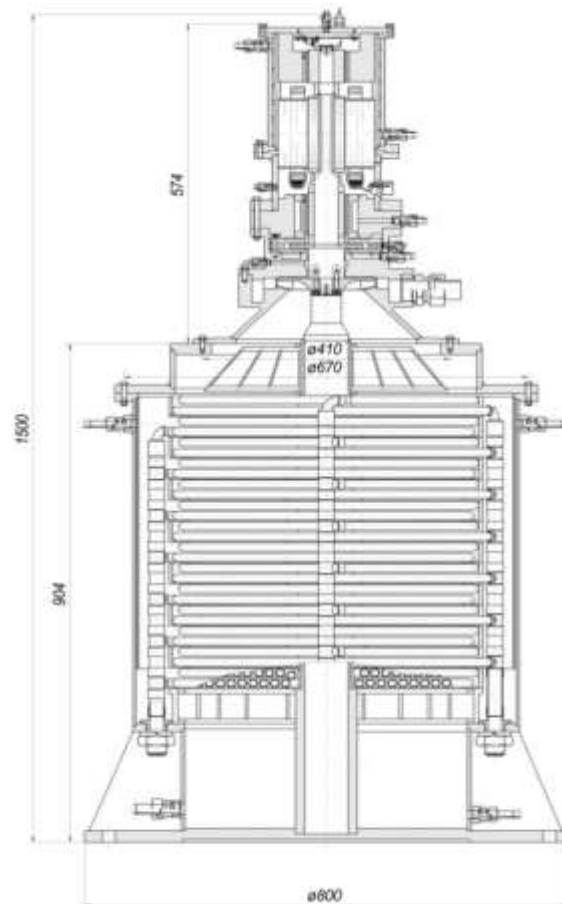




## Вертикальная влажно-паровая микротурбина ВПМТ-30

### Основные характеристики ВПМТ-30

№ п/п	Физическая величина и её обозначение	Единицы измерения	Значение параметра
1	Начальное давление пара, $p_0$	МПа	0,6
2	Начальная температура пара, $t_0$	°С	160
3	Расход пара, $G$	кг/с	0,1514
4	Частота вращения, $n$	1/с	583,3
5	Электрическая мощность турбины, $N_э$	кВт	30,92
6	Мощность конденсатора - сетевого подогревателя, $N_{сп}$	кВт	305



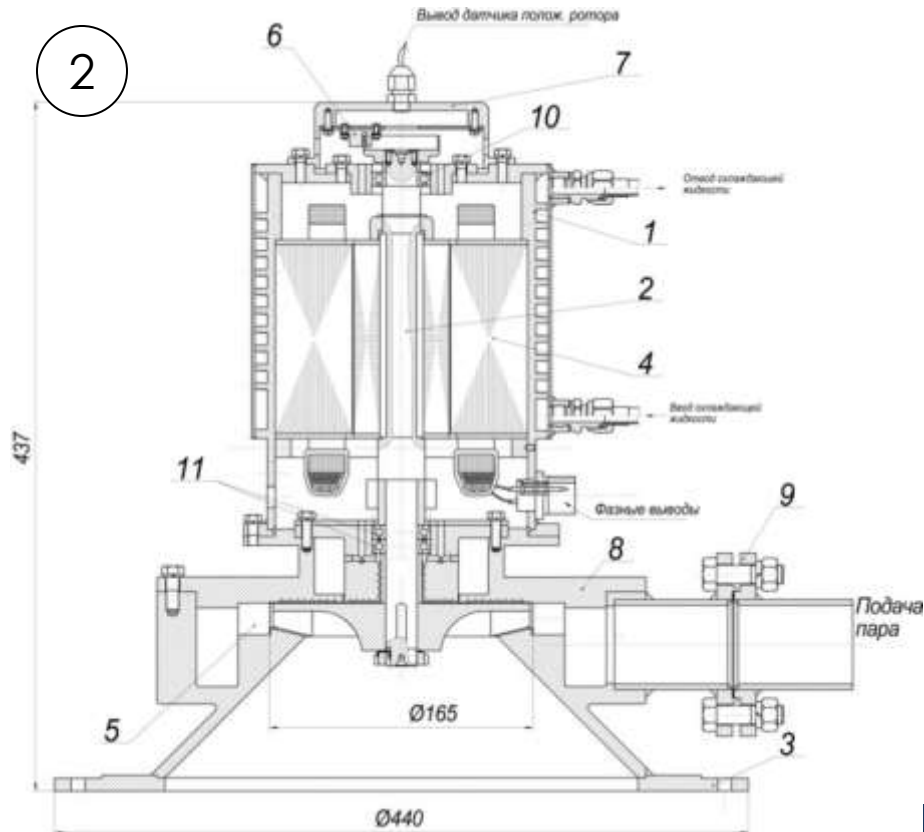
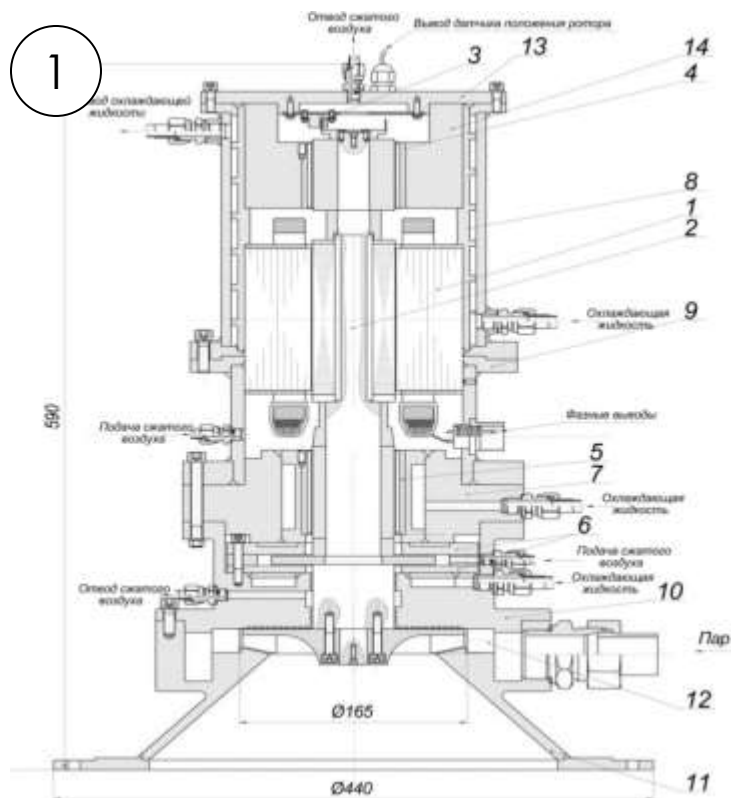




## Турбогенераторы ВПМТ-30

Имеется две модификации турбогенератора ВПМТ-30.

1. Турбогенератор на газодинамических лепестковых подшипниках.
2. Турбогенератор на керамических шариковых подшипниках.





## Подшипники турбогенераторов ВПМТ-30

В ВПМТ-30 были применены как подшипники скольжения – радиальные (1а) и осевые (1б) лепестковые газодинамические подшипники, так и подшипники качения – радиально-осевые (2) керамические подшипники. При использовании подшипников скольжения используется, так называемая воздушная смазка, то есть вал вращается на воздушной подушке (зазоре).

1а



1б



2

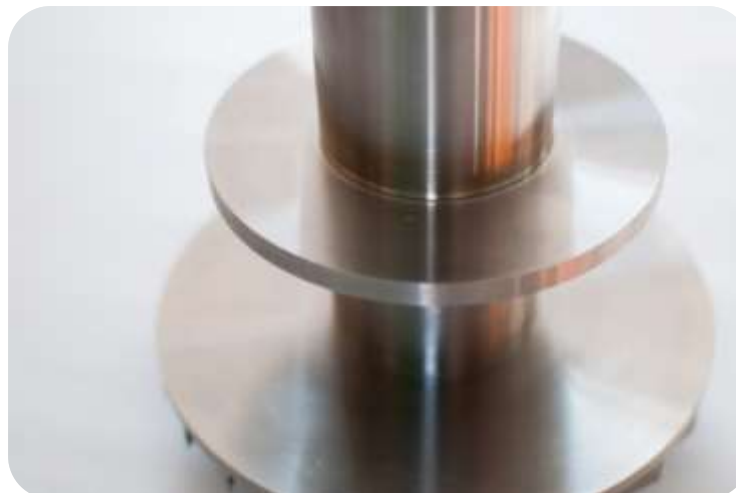




## Динамичность вертикальных микротурбин

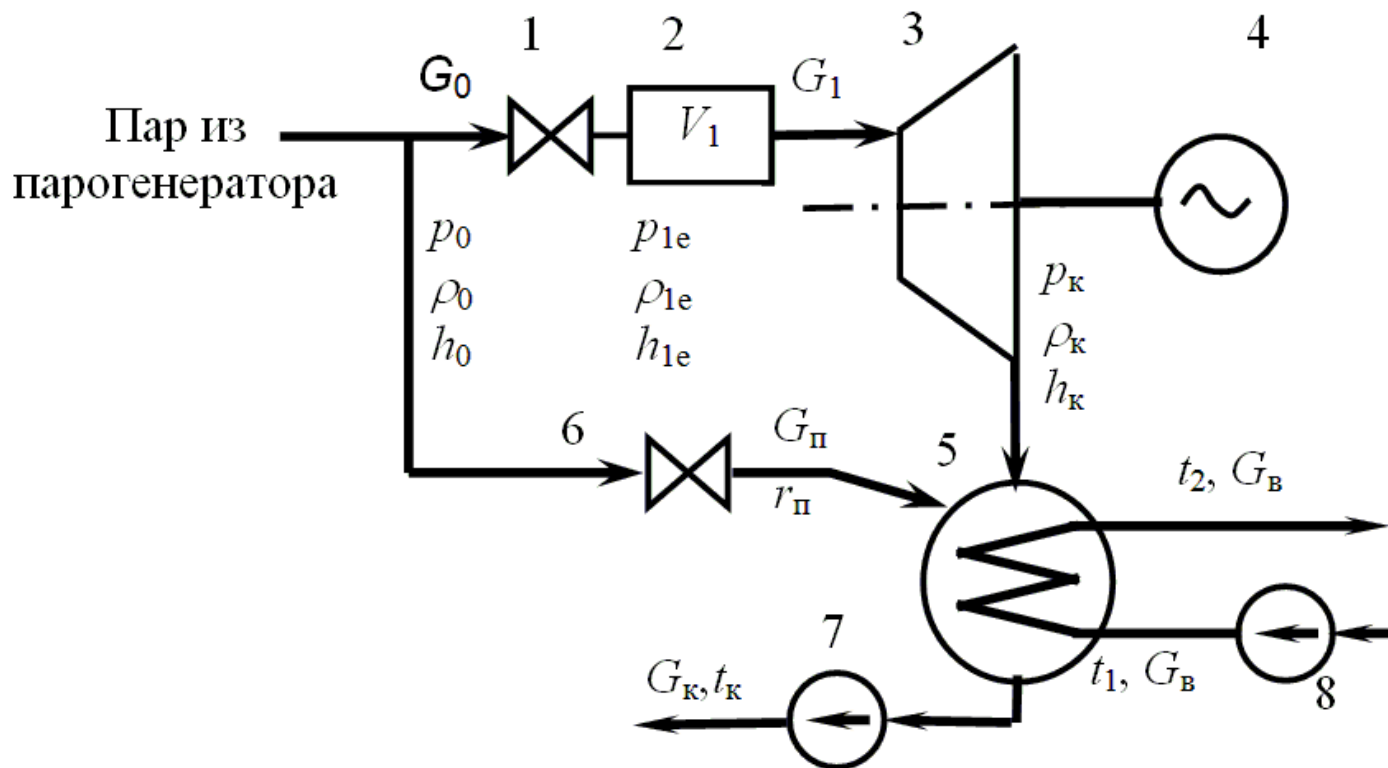
На динамичность изменения режимов работы микротурбинной установки оказывают влияние следующие динамические характеристики:

- подшипниковых узлов микротурбины;
- самой микротурбины;
- конденсатора;
- электрогенератора.





## Динамичность вертикальных микротурбин



Расчётная схема ВПМТ-30: 1 – регулирующий клапан высокого давления; 2 – емкость парового пространства; 3 – турбина; 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – клапан перепуска пара помимо турбины; 7 – конденсатный насос; 8 – циркуляционный насос.



## Работа турбогенератора микротурбины. Основные уравнения

Исходное уравнение ротора турбины:

$$J \frac{d\omega}{d\tau} = M_{\tau} - M_c - M_{\Gamma}$$

Ввод относительных моментов сил:

$$\frac{M_{\tau}}{M_{\text{ТН}}} = m_{\tau} \quad \frac{M_c}{M_{\text{ТН}}} = v_c \quad \frac{M_{\Gamma}}{M_{\text{ТН}}} = v_{\Gamma}$$

Преобразованное уравнение ротора турбины:

$$T_0 \frac{d\varphi}{d\tau} = g_1 - v_c - v_{\Gamma}$$

Относительный расход на выходе, пропорциональный разности давлений на входе и на выходе турбины:

$$g_1 = \frac{G_1}{G_{0н}} = f(p_1 - p_2) = \sqrt{\frac{r_1^2 - r_k^2}{r_{10}^2 - r_{k0}^2}}$$

Определение относительного хода главного клапана  $\mu_1$ :

$$T_2 \frac{d\mu_1}{d\tau} = h - \mu_1$$

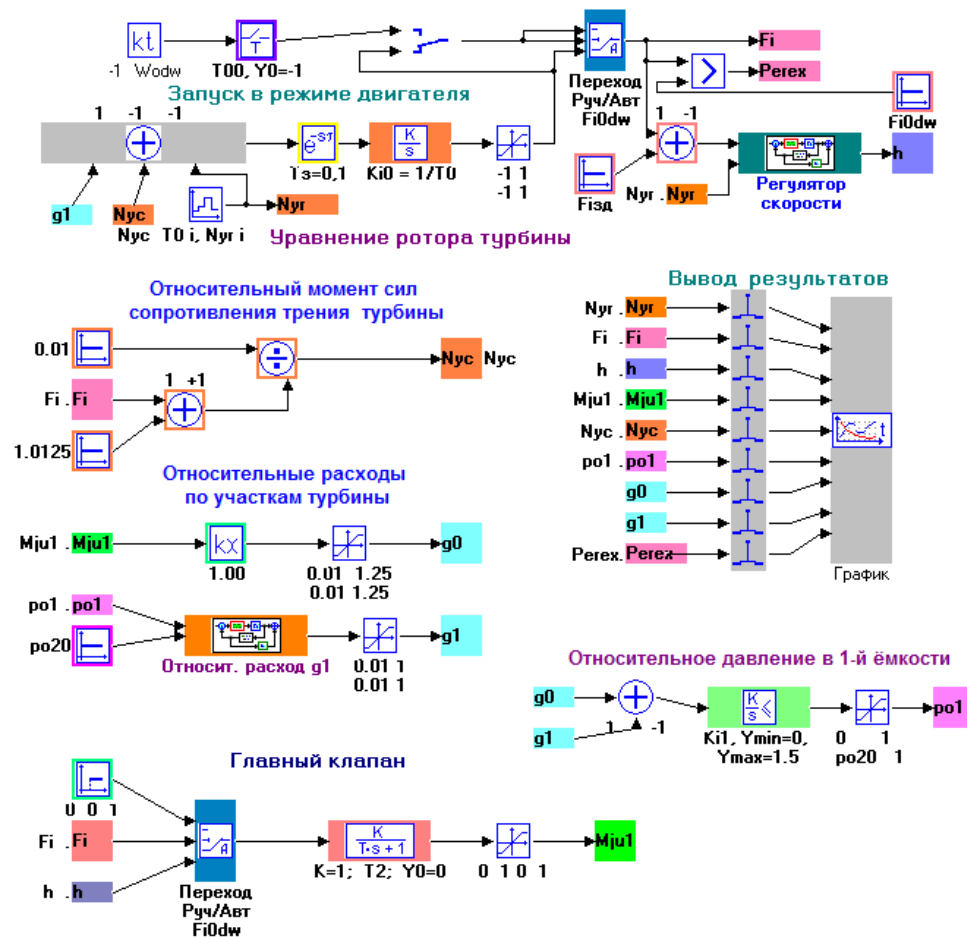
Уравнение для регулятора скорости при работе без электрогидравлического преобразователя:

$$h = -\varphi K_{yc} \quad \text{если } \varphi > -0,5$$



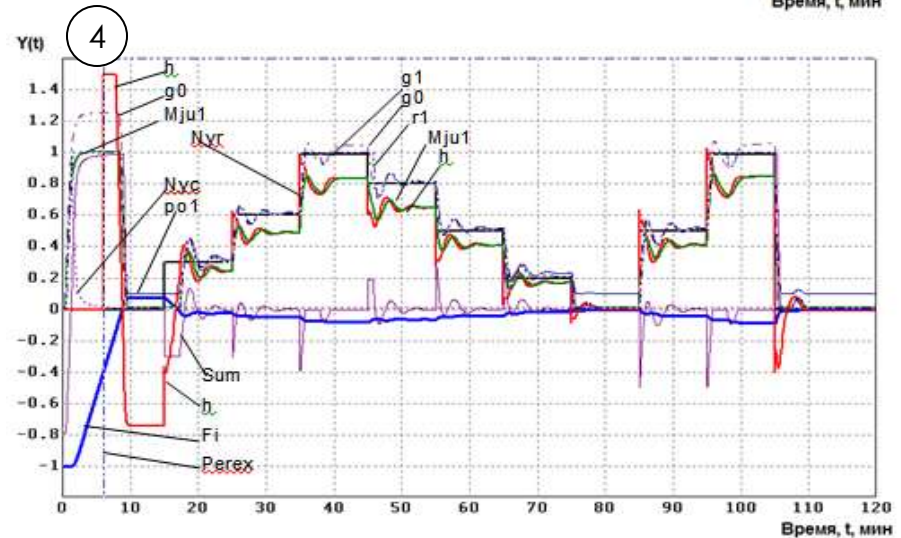
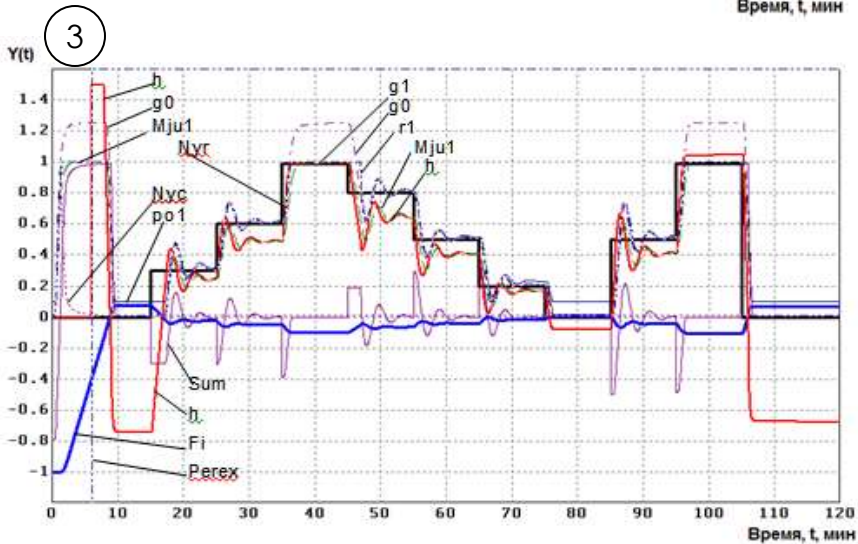
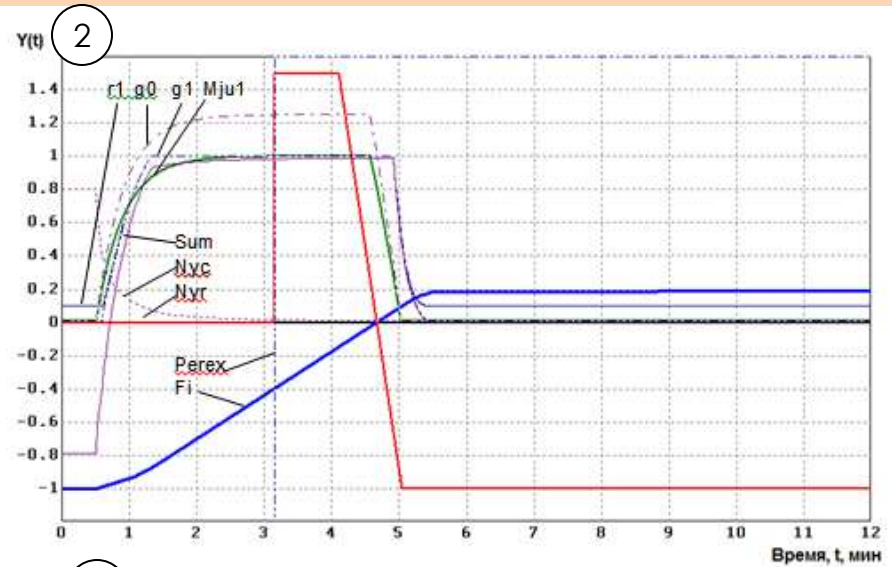
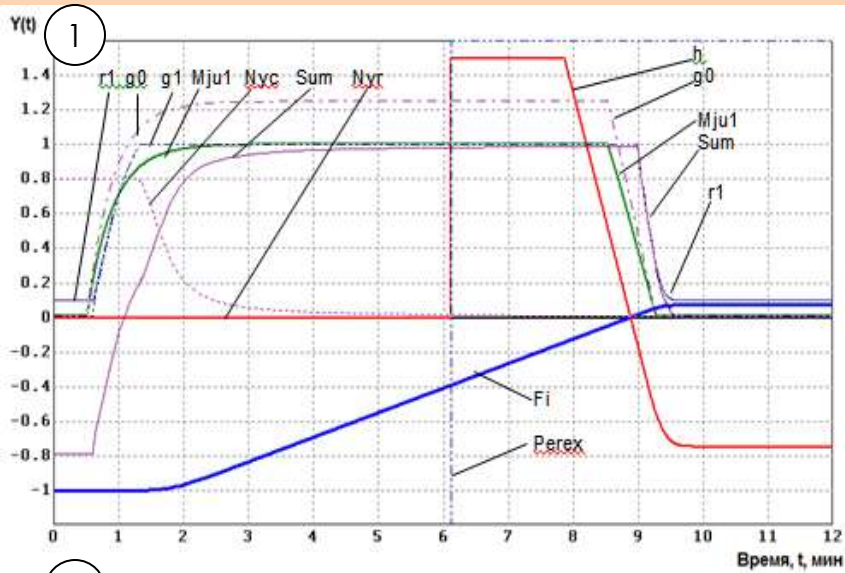
## Динамичность вертикальных микротурбин

В процессе имитационного моделирования был принят регулятор, в котором использовались принципы регулирования как по отклонению регулируемой величины – скорости вращения ротора турбины, так и по возмущению нагрузки – потребляемой мощности.



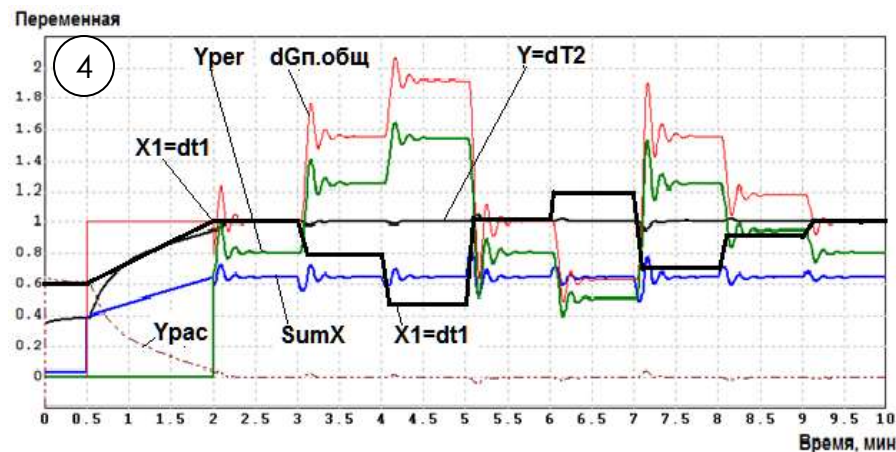
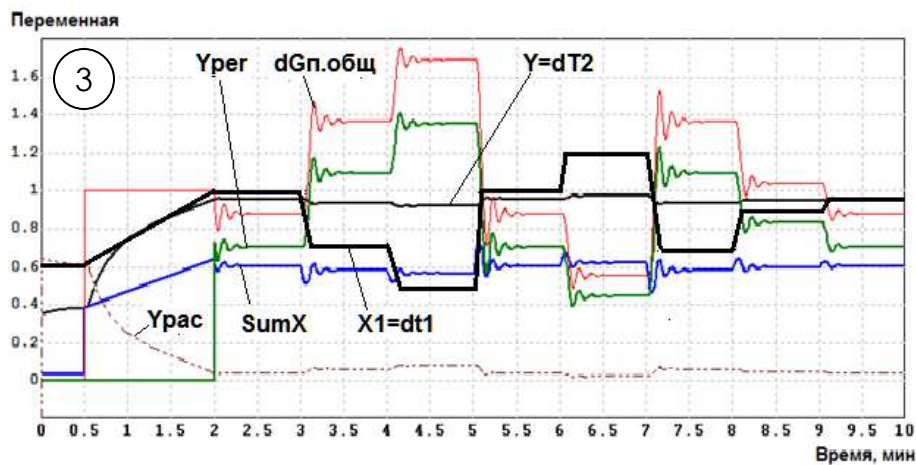
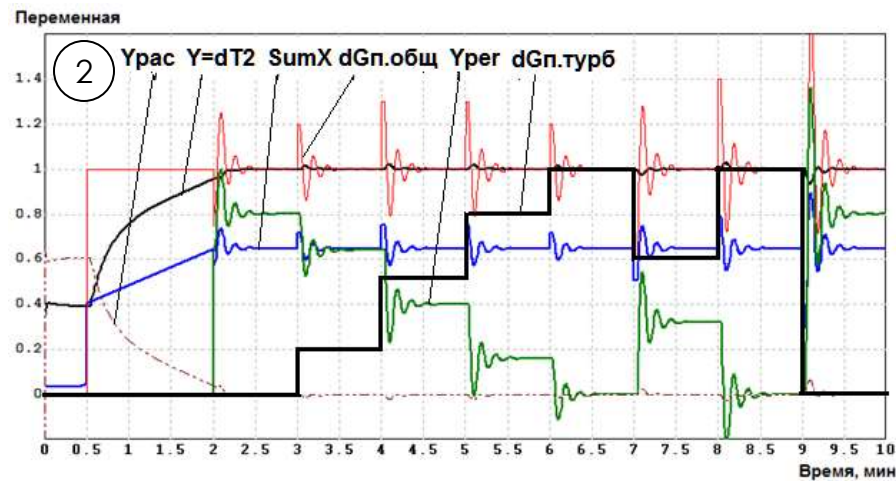
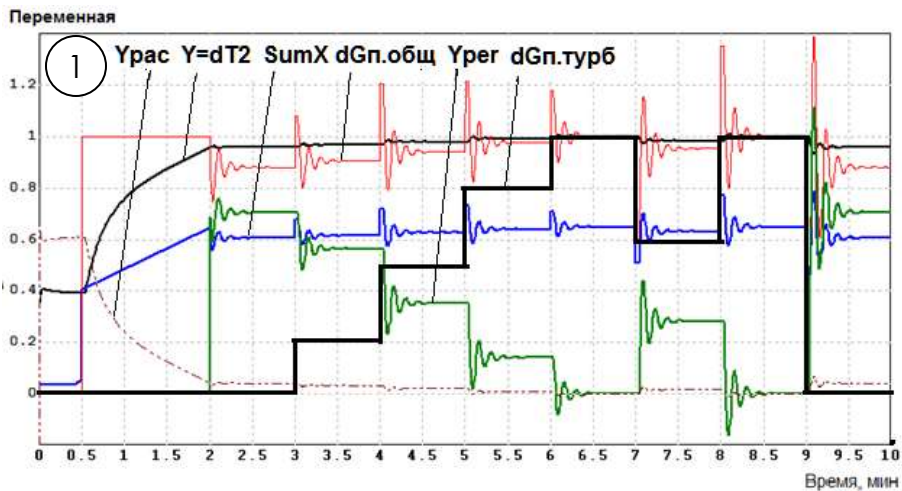


## Результаты имитационного моделирования турбогенератора





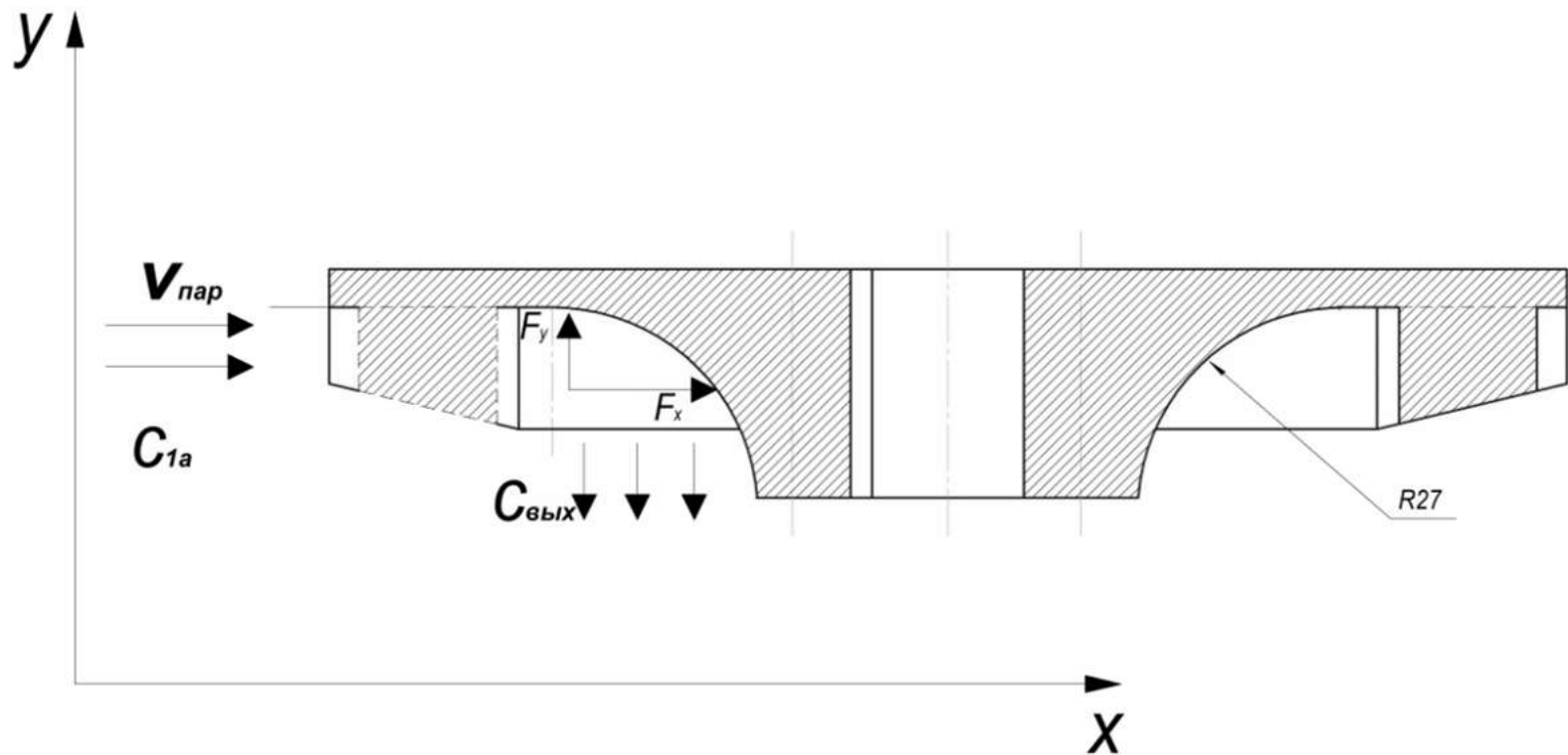
## Результаты имитационного моделирования конденсатора





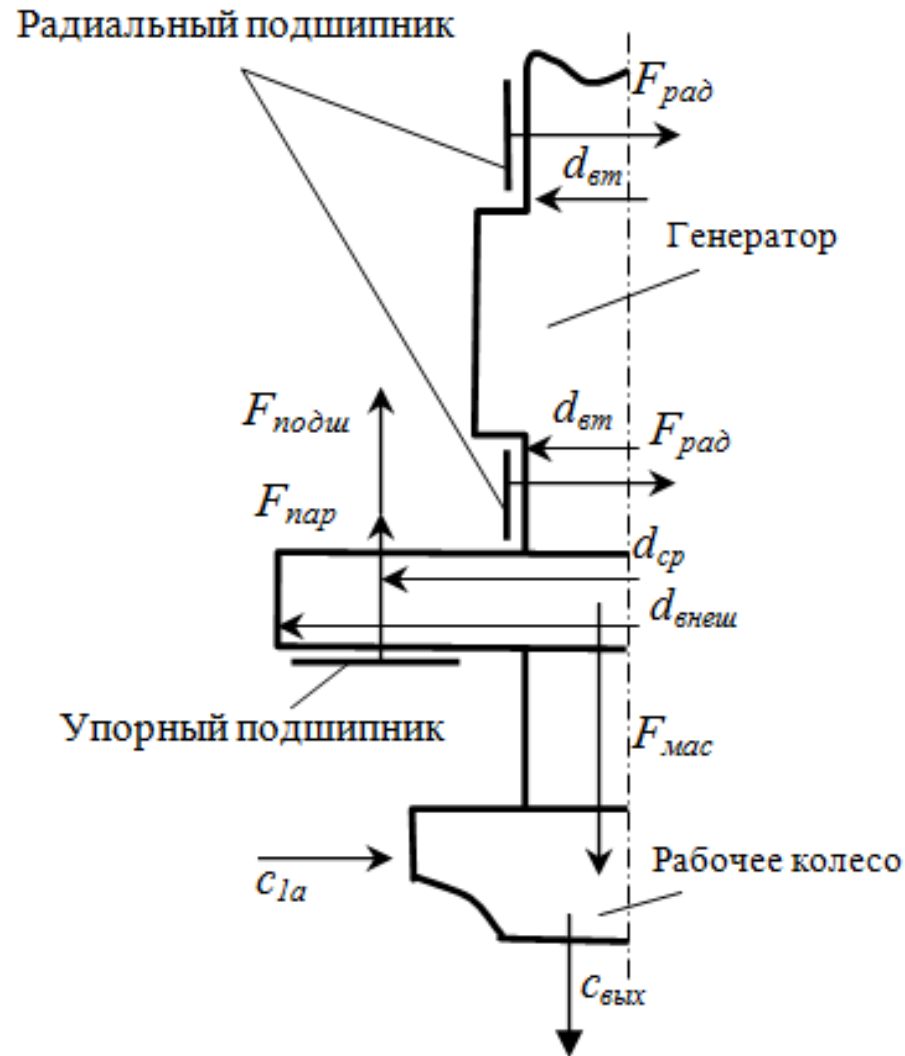


## Действие пара на рабочее колесо ВПМТ-30





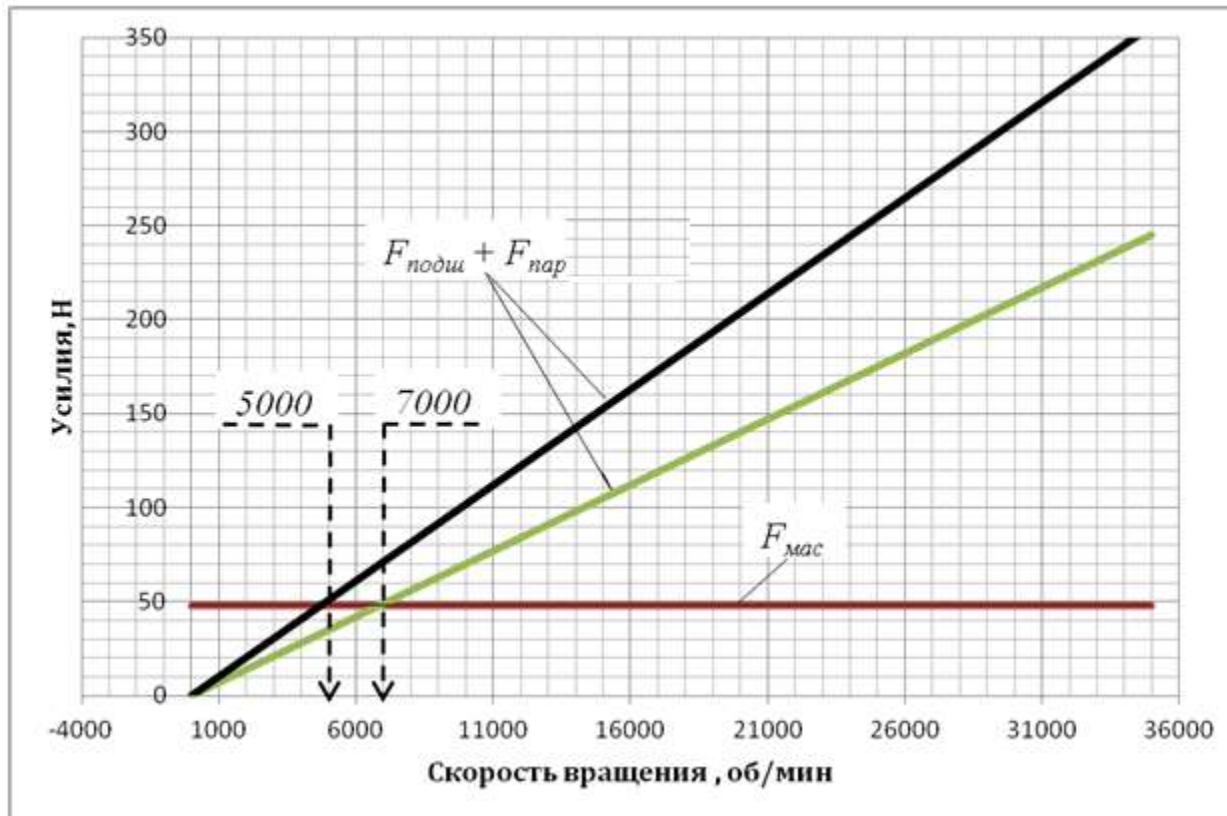
## Схема приложения усилий на упорный подшипник





## Определение момента всплытия вала в осевом газодинамическом подшипнике

Изменение действия усилий при увеличении скорости вращения ротора вертикальной микротурбины ВПМТ-30. Диапазон частоты вращения, при которой вал всплывает: 5000 -7000 об/мин.





## Результаты математического моделирования работы микротурбины

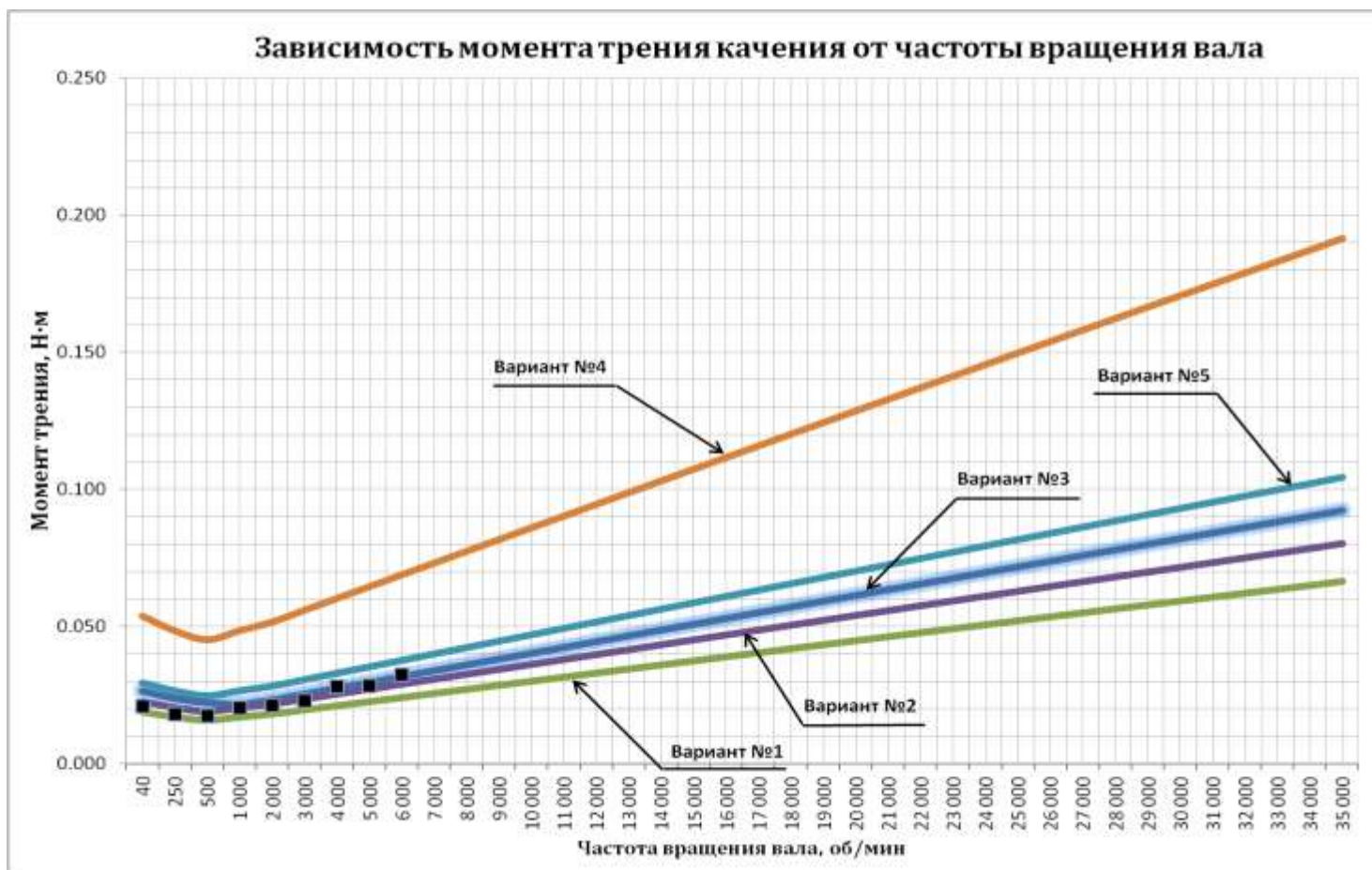
Зависимость моментов сил трения в турбогенераторе от скорости вращения вала на различных моделях газодинамических подшипников





## Результаты математического моделирования работы микротурбины

Зависимость моментов сил трения в турбогенераторе от скорости вращения вала на различных моделях керамических подшипников





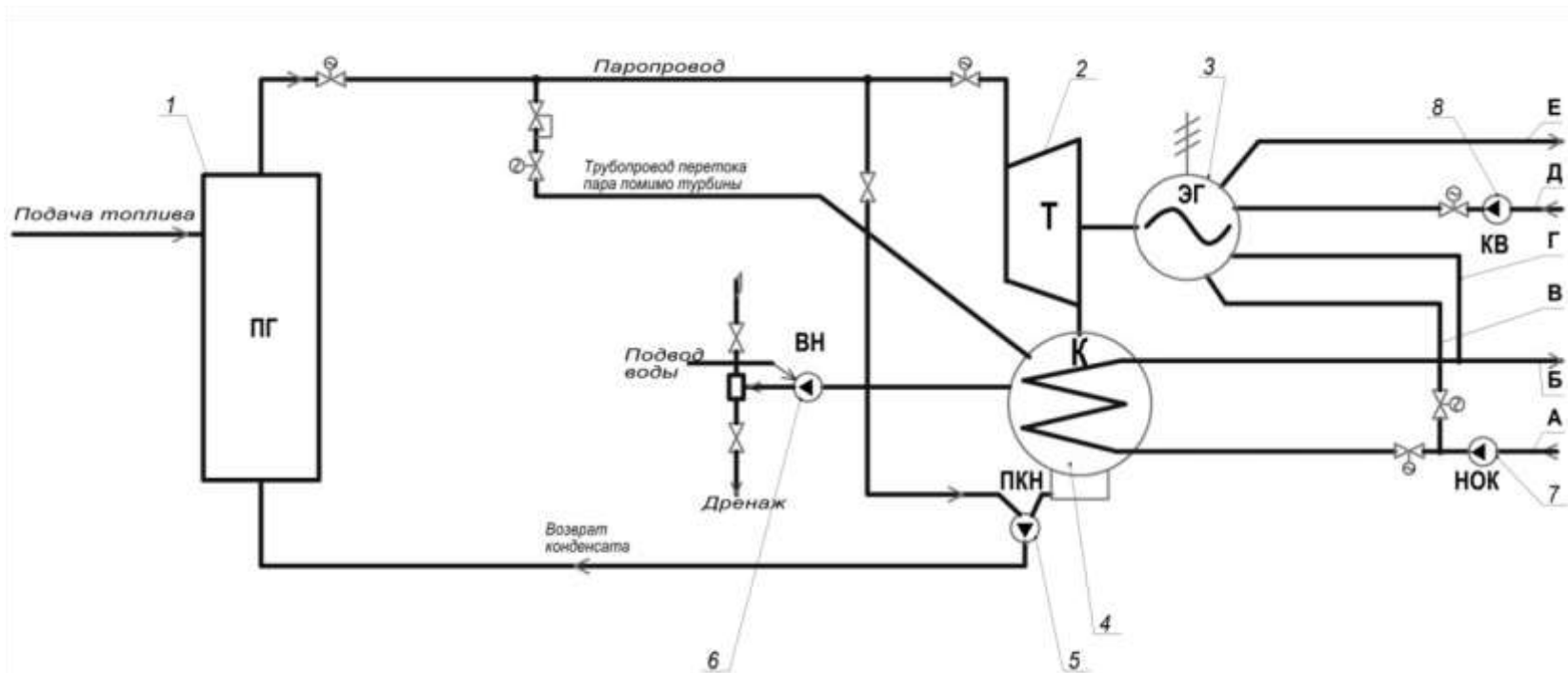
## Сравнение математического моделирования и эксперимента





## Динамичность вертикальных микротурбин

Тепловая схема микроэнергокомплекса имеет некоторые отличительные особенности по сравнению с традиционными схемами производства электроэнергии и тепла. Она может работать на любом органическом и искусственном топливе, а для поддержания требуемого вакуума в конденсаторе применен водокольцевой вакуумный насос. Это позволило существенно упростить тепловую схему и убрать дополнительный теплоноситель – термическое масло и раствор этиленгликоля.





## Испытательный стенд влажно-паровой микротурбины

Испытания проходили в двух режимах:

- в режиме электродвигателя в лабораторных условиях;
- в режиме холостого хода на НчГРЭС.

1 – турбогенератор; 2 – конденсатор; 3 – главный паровой клапан;  
4 – вакуумный насос;  
5 – конденсатный насос

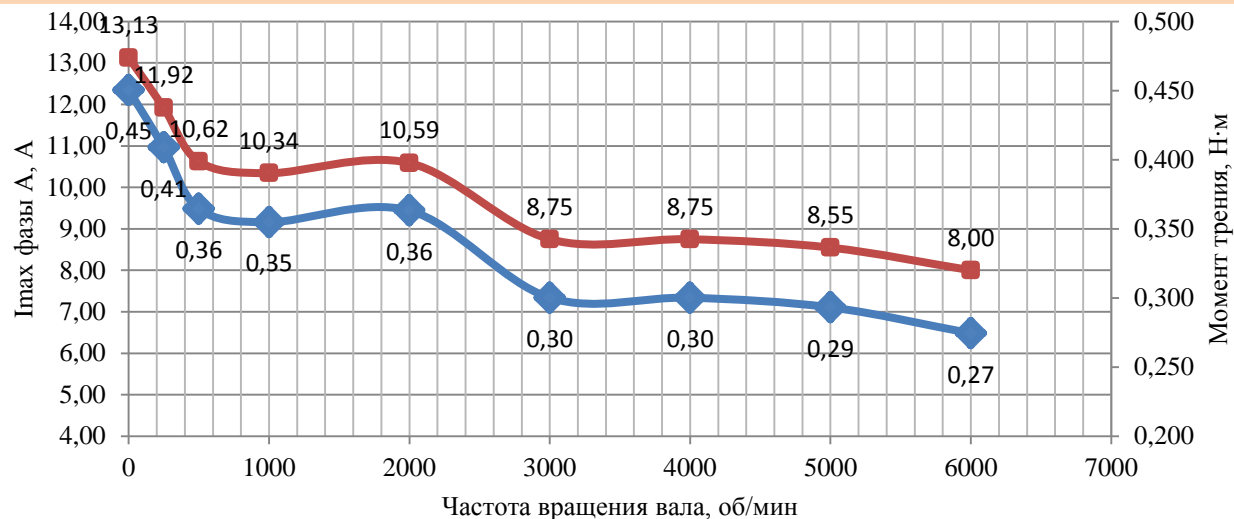




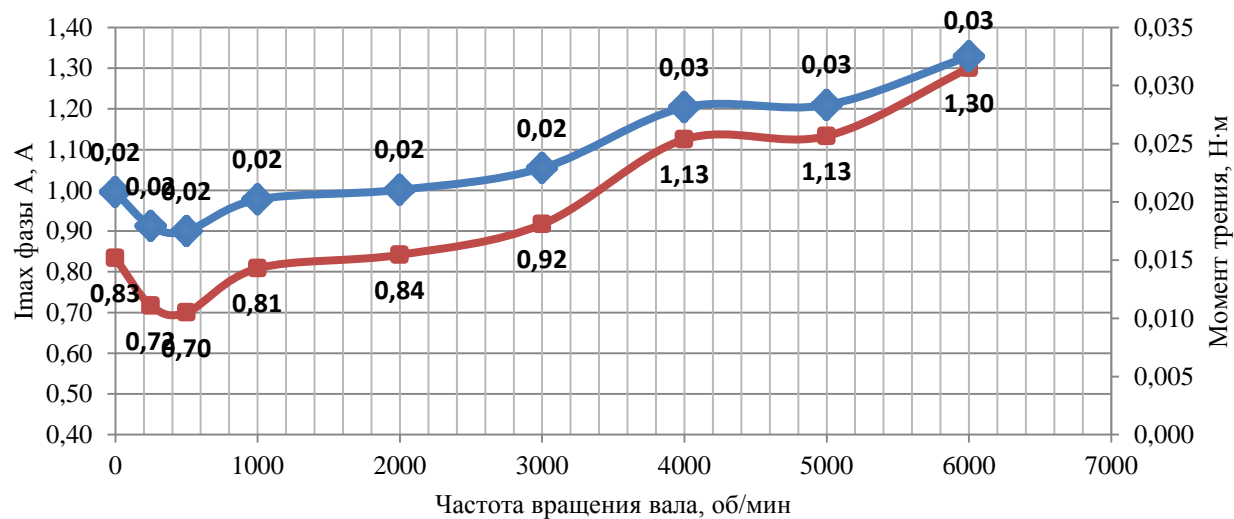


## Экспериментальное определение моментов сил в турбогенераторе

### Газодинамические подшипники



### Керамические подшипники





## Рекомендации по комплектации вертикальных турбомашин

### Энергообеспечение одного частного коттеджа

Для комбинированного режима работы, т.е. для режима работы микротурбины с частыми пусками будет оптимальным применение керамических подшипников качения.

### Энергообеспечение коттеджного поселка или небольшого городского района

При непрерывной работе микротурбины оптимально применение подшипников скольжения, например – газодинамических. Также в вертикальных турбоагрегатах оптимально использование комбинированных подшипников. Например, для рассматриваемой микротурбиной установки наименьшие усилия для ее работы будут возникать при использовании в качестве упорных подшипников – керамических подшипников качения, а в качестве опорных подшипников – газодинамические подшипники скольжения.



Спасибо за внимание!

