

авнительный анализ схем приводов азоперекачивающих агрегатов 0.11

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«Московский государственный технический
университет**

имени Н.Э. Баумана»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ "Энергомашиностроение"

КАФЕДРА Э-3 "Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки"

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по теме: Системы охлаждения ГТД

группа: ЭЗ-111

Выполнил(а) студент(ка) _____ **А.Клюквин**

(подпись, дата)

Руководитель _____ **С.Бурцев**

(подпись, дата)

Москва - 2017 г.

Содержание

0.1	Сравнительный анализ схем приводов газоперекачивающих агрегатов	1
0.1.1	Обзор существующих схем	1
0.1.2	Расчетная модель	4
0.1.3	Условия сравнения установок	6
0.1.4	Результаты расчетов	8
0.1.5	Анализ полученных данных	23
0.1.6	Заключение	25
1	Список литературы	27
0.1	Сравнительный анализ схем приводов газоперекачивающих агрегатов	

0.1.1 Обзор существующих схем

Одной из особенностей эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) в качестве привода ГПА является практически постоянная работа установки на режимах частичной мощности [1]. В связи с этим на этапе вариантного проектирования привода ГПА необходимо проводить сравнительную оценку рассматриваемых вариантов в широком диапазоне рабочих мощностей.

В данной работе проводится анализ эффективности работы газотурбинных двигателей различных схем в диапазоне мощностей 30-100% номинальной мощности и дается оценка эффективности использования ГТУ таких схем в качестве приводов ГПА.

Газотурбинные установки ГПА могут быть разделены на изначально стационарные и конвертированные из авиационных и судовых двигателей.

Все стационарные установки, за исключением ГТ-700-4 и ГТК-25, двухвальные (ГТ-700-4 – одновальная, ГТК-25 – трехвальная). Камеры сгорания стационарных ГТУ индивидуальные, находятся вне корпусов турбин и представляют собой либо одну камеру цилиндрической формы, установленную вертикально или горизонтально, либо несколько секционных камер малого объема, равномерно расположенных по периметру ТВД (ГТН-16 и ГТН-25) [2].

Газотурбинные установки на базе авиационных двигателей являются продуктом конвертирования авиационных турбин. Перед установкой авиационных двигателей на ГПА они переводятся с жидкого топлива на газовое.

Для транспорта используются главным образом двигатели авиалайнеров Ту 114 и Ту 154, НК-12МВ и НК-8-2У с маркировкой после конвертации НК-12СТ и НК-16СТ – мощностью соответственно 6,3 МВт и 16 МВт. Первый из приведенных двигателей входит в состав газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-6,3, а второй – агрегата ГПА-Ц-16 [2].

Отличительными особенностями ГТУ с авиационными двигателями является наличие у них встроенных в корпуса турбин камер сгорания кольцевой формы и большее количество валов по сравнению со стационарными ГТУ (два у ГПА-Ц-6,3 и три у ГПА-Ц-16) [2].

В большинстве такие ГТУ имеют два компрессора и три последовательно расположенные газовые турбины: турбина высокого давления (ТВД), турбина среднего давления (ТСД) и турбина низкого давления (ТНД) – силовая турбина, находящаяся на одном валу с нагнетателем газа. Компрессор первой ступени сжатия приводится во вращение от турбины среднего давления, компрессор второй ступени сжатия – от турбины высокого давления. Конструк-

тивно вал компрессора первой ступени сжатия и турбины среднего давления располагается внутри вала, соединяющего компрессор второй ступени сжатия и турбину высокого давления. Компрессоры первой и второй ступени сжатия работают на различных частотах вращения. Газотурбинные установки подобных схем позволяют получить высокие соотношения давлений сжатия в цикле – на уровне 16-20, что в сочетании с относительно высокими температурами газов перед ТВД в авиационных ГТУ () позволяет получать КПД установки на уровне 34-35% и даже выше [2].

Желание получить в газотурбинных установках большую удельную мощность и высокий КПД, привело к разработке и созданию установок с несколькими ступенями сжатия воздуха в осевых компрессорах и его промежуточным охлаждением в процессе сжатия между компрессорами, несколькими ступенями подогрева рабочего тела между газовыми турбинами в процессе его расширения и с регенерацией теплоты отходящих газов. Комплексное использование теплотехнических мероприятий: промежуточное охлаждение воздуха в процессе его сжатия, регенеративный подогрев воздуха после компрессоров и промежуточный подвод тепла в процессе расширения, дают наибольший эффект как на пути повышения КПД установки (который может достигать величины порядка 40-45% [1]), так и удельной мощности ГТУ.

Однако, трудность освоения и использования сложных схем ГТУ, низкие показатели теплообменных аппаратов, отсутствие мобильности при эксплуатации установок приводят к тому, такие установки целесообразны к использованию только в системах большой энергетики [2].

В данной работе проводится анализ установок следующих схем:

- Двухвальная установка со свободной турбиной.
- Двухвальная установка со свободной турбиной и регенератором.

- Трехвальная установка со свободной турбиной.

0.1.2 Расчетная модель

В данной работе моделирование ГТУ производится на уровне модели первого уровня, то есть установка разбивается на узлы, взаимодействие между которыми описывается с помощью уравнений, отображающих балансы расходов, энергий и импульсов.

В составе ГТУ можно выделить следующие узлы:

- Компрессор;
- Турбина;
- Камера сгорания;
- Регенератор;
- Узел потери давления (таким узлом моделируются фильтры, трубопроводы и пр.);
- Трансмиссии (с их помощью в модель вводятся механические потери передачи мощности от турбины к компрессору);
- Узлы нагрузки, моделирующие внешних потребителей мощности.

Узлы компрессоров, турбин, камер сгорания и регенераторов реализованы в двух вариантах: в варианте, позволяющем проводить завязку двигателя на номинальном режиме работы и варианте, позволяющем рассчитывать параметры двигателя на режимах частичной мощности. Такое разделение сделано для оптимизации времени численного счета, так как схема, составленная

только из узлов, предназначенных для расчета двигателя на номинальном режиме, не требует численного решения систем нелинейных уравнений и, следовательно, имеет гораздо меньшую вычислительную сложность.

Расчетные узлы компрессоров, турбин и камер сгорания на номинальном режиме работы были реализованы по методике [3].

Регенератор на номинальном режиме работы задавался своим коэффициентом регенерации σ , определяемым по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{T_{Г\text{ ВХ}} - T_{Г\text{ ВЫХ}}}{T_{Г\text{ ВХ}} - T_{Х\text{ ВХ}}}$$

где $T_{Г\text{ ВХ}}$, К – температура газа на входе в горячий канал теплообменного аппарата, $T_{Г\text{ ВЫХ}}$, К – температура газа на выходе из горячего канала теплообменного аппарата, $T_{Х\text{ ВХ}}$, К – температура на входе в холодный канал теплообменного аппарата, $T_{Х\text{ ВЫХ}}$, К – температура на выходе из холодного канала теплообменного аппарата.

Узел потери давления задавался коэффициентом сохранения полного давления σ , связывающий входное $p_{ВХ}$, Па и выходное $p_{ВЫХ}$, Па давления на границах узла следующим соотношением:

$$p_{ВЫХ} = \sigma \cdot p_{ВХ}.$$

Узлы трансмиссии задавались своими механическими КПД η_m , связывающими механическую мощность на выходе из узла $N_{ВЫХ}$, Вт и на входе в него $N_{ВХ}$, Вт следующим соотношением:

$$N_{ВЫХ} = N_{ВХ} \cdot \eta_m.$$

На режиме частичной мощности узлы компрессоров, турбин и камер сгорания рассчитывались, согласно методике [4]. В качестве характеристик компрессоров использовались обобщенные характеристики из [5]. В качестве характеристик турбин использовались обобщенные соотношения из [6].

Регенератор на режиме частичной мощности рассчитывался по методике [7].

Полезная нагрузка на режиме частичной мощности задавалась своей характеристикой в форме:

$$N_e = N_{e0} \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^3$$

где N_e , МВт – мощность нагрузки, N_{e0} , МВт – мощность нагрузки на номинальной частоте вращения, n об/мин – частота вращения вала нагрузки, n_0 об/мин – номинальная частота вращения вала нагрузки. Такая характеристика нагрузки является характерной для центробежных нагнетателей природного газа [8].

0.1.3 Условия сравнения установок

Сравнение установок проводилось в следующих условиях:

- Номинальная мощность установок – 16 МВт.
- Температура газа в основной камере сгорания – 1450 К.
- Для трехвальных установок степени повышения давления в обоих компрессорах равны.

Параметры, общие для всех установок, представлены в таблице 0.1.

Таблица 0.1: Параметры, общие для всех установок

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Температура атмосферного воздуха	T_v	К	288
Давление атмосферного воздуха	p_v	Па 10^5	

Продолжение таблицы 0.1

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Температура газа на номинальном режиме	T_{Γ}	К	1450
Температура топлива	$T_{\text{т}}$	К	300
Калориметрическая температура	T_0 К	300	
Коэффициент сохранения полного давления во входном устройстве	$\sigma_{\text{вх}}$	-	0,98
Коэффициент сохранения полного давления во выходном устройстве	$\sigma_{\text{вых}}$	-	0,93
Коэффициент сохранения полного давления в основной камере сгорания	σ_{Γ}	-	0,98
Полнота сгорания топлива в основной камере сгорания	η_{Γ}	-	0,99
Механические КПД валов	$\eta_{\text{м}}$	-	0,99
Мощность нагрузки на номинальном режиме	N_e	МВт	16
Частота вращения вала нагрузки на номинальном режиме	n_0	об/мин	3000

На номинальном режиме проводилось исследование зависимости удельной работы L_e , Дж/кг, КПД установки η_e и расхода воздуха через входное сечение

первого компрессора G_B , кг/с от степени повышения давления в компрессорах.

Для удобства сравнения на графиках все значения отнесены к максимальным значениям соответствующих параметров, достигающихся на рассматриваемом диапазоне. Относительные параметры определяются следующим образом:

$$\overline{L_e} = L_e / L_{e \max},$$

$$\overline{\eta_e} = \eta_e / \eta_{e \max},$$

$$\overline{G_B} = G_B / G_{B \max}.$$

На режимах частичной мощности исследовались зависимости КПД и расхода воздуха через входное сечение первого компрессора от мощности установки. На графиках этого вида для удобства также представлены зависимости параметров $\overline{\eta_e}$ и $\overline{G_B}$ от параметра $\overline{N_e} = n_e / N_{e \text{ ном}}$, где $N_{e \text{ ном}}$ - номинальная мощность установки (для всех установок $N_{e \text{ ном}} = 16 \text{ МВт}$).

0.1.4 Результаты расчетов

Ниже представлены результаты расчетов различных схем установок для условий сравнения, описанных выше.

Двухвальная безрегенеративная схема представлена на рис. 0.1.

Рис. 0.1: Схема двухвальной безрегенеративной установки (К – компрессора, КС – камера сгорания, ТК – турбина компрессора, ТС – силовая турбина)

Параметры, характерные для двухвальной безрегенеративной установки, представлены в табл. 0.2.

Таблица 0.2: Параметры двухвальной безрегенеративной схемы

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Адиабатический КПД компрессора	η_{κ}^*	-	0,82
КПД турбины компрессора	$\eta_{\text{ТК}}^*$	-	0,90
КПД силовой турбины	$\eta_{\text{ТС}}^*$	-	0,92
Номинальная частота вращения вала высокого давления	n_0 в.д. об/мин	$12 \cdot 10^3$	

Параметры цикла двухвальной безрегенеративной установки на номинальном режиме представлены на рис. 0.8.

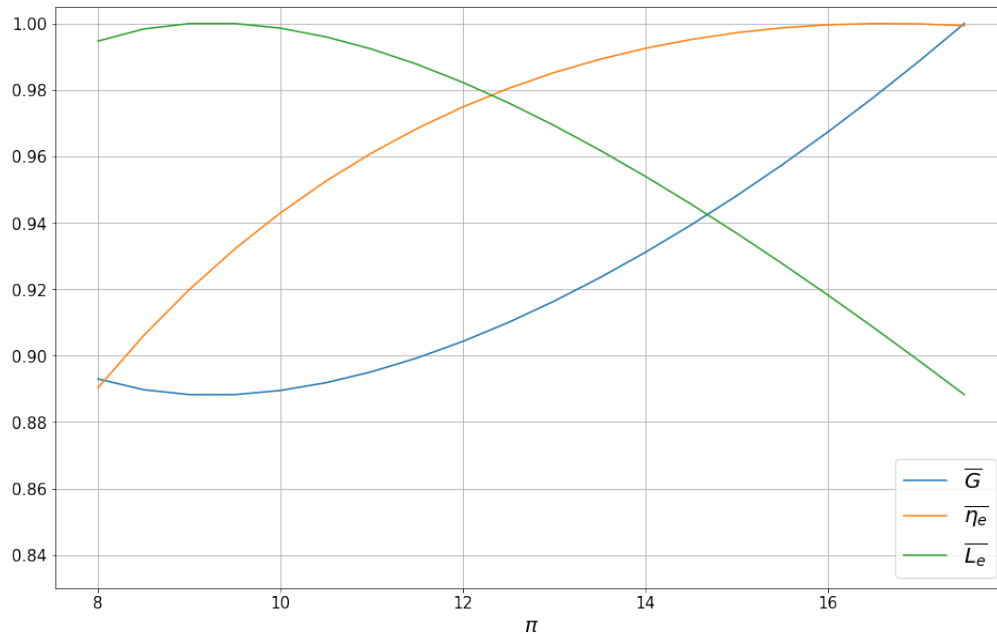


Рис. 0.2: Параметры цикла двухвальной безрегенеративной установки на номинальном режиме

В точке, соответствующей максимальному КПД установка имеет параметры, указанные в табл. 0.3.

Таблица 0.3: Параметры двухвальной безрегенеративной установки в точке, соответствующей максимальному КПД

π_k	L_e , МДж/кг	η_e	G_b , кг/с
16,5	0,270	0,325	59,2

В точке, соответствующей максимальной удельной работе установка имеет параметры, указанные в табл. 0.4.

Таблица 0.4: Параметры двухвальной безрегенеративной установки в точке, соответствующей максимальной удельной работе

π_k	L_e , МДж/кг	η_e	G_b , кг/с
9,5	0,297	0,303	53,8

В качестве расчетной выбирается точка, соответствующая максимальному КПД.

Параметры двухвальной безрегенеративной схемы представлены на рис. 0.3.

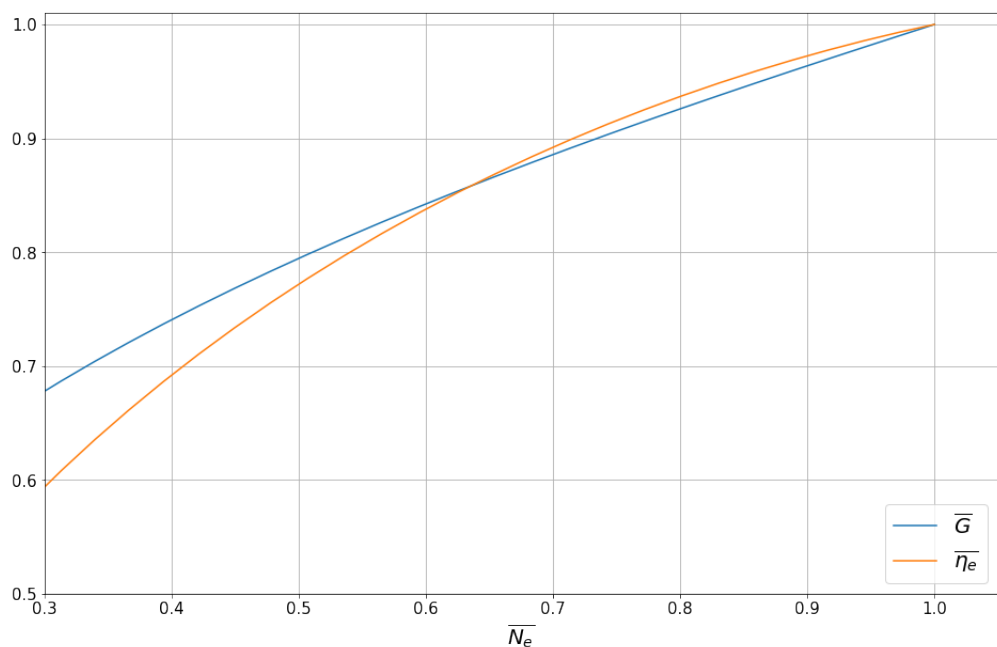


Рис. 0.3: Параметры цикла двухвальной безрегенеративной установки на режимах частичной мощности

Двухвальная регенеративная схема представлена на рис. 0.4.

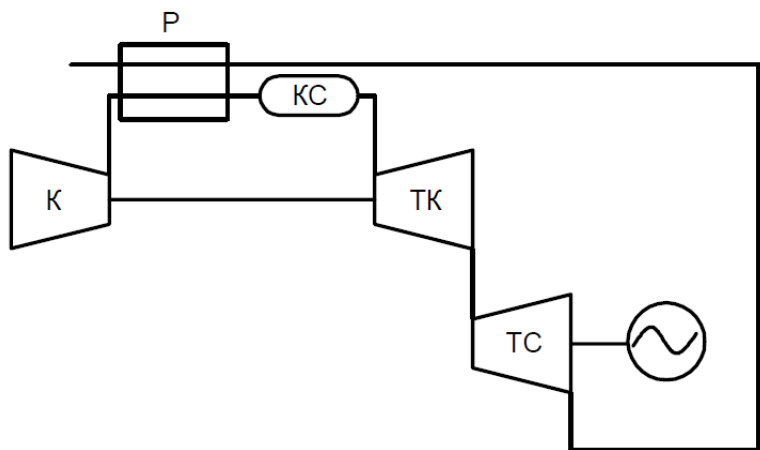


Рис. 0.4: Схема двухвальной регенеративной установки (К – компрессора, КС – камера сгорания, ТК – турбина компрессора, ТС – силовая турбина, Р – регенератор)

Параметры регенеративной двухвальной установки идентичны параметрам установки без регенератора (табл. 0.8). Коэффициент регенерации на

номинальном режиме $\sigma_p = 0,8$.

Параметры цикла двухвальной безрегенеративной установки на номинальном режиме представлены на рис. ??.

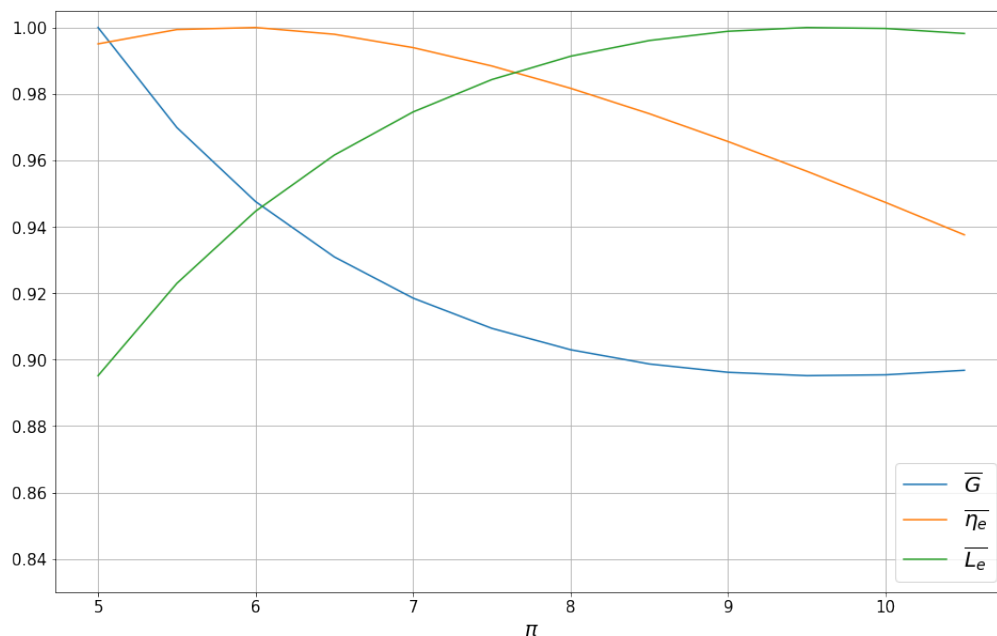


Рис. 0.5: Параметры цикла двухвальной регенеративной установки на номинальном режиме

В точке, соответствующей максимальному КПД установка имеет параметры, указанные в табл. 0.5.

Таблица 0.5: Параметры двухвальной регенеративной установки в точке, соответствующей максимальному КПД

π_k	L_e , МДж/кг	η_e	G_b , кг/с
6,0	0,281	0,419	57,0

В точке, соответствующей максимальной удельной работе установка имеет параметры, указанные в табл. 0.4.

Таблица 0.6: Параметры двухвальной регенеративной установки в точке, соответствующей максимальной удельной работе

π_k	L_e , МДж/кг	η_e	G_B , кг/с
9,5	0,297	0,401	53,8

В качестве расчетной выбирается точка, соответствующая максимальному КПД.

Параметры двухвальной регенеративной схемы представлены на рис. 0.6.

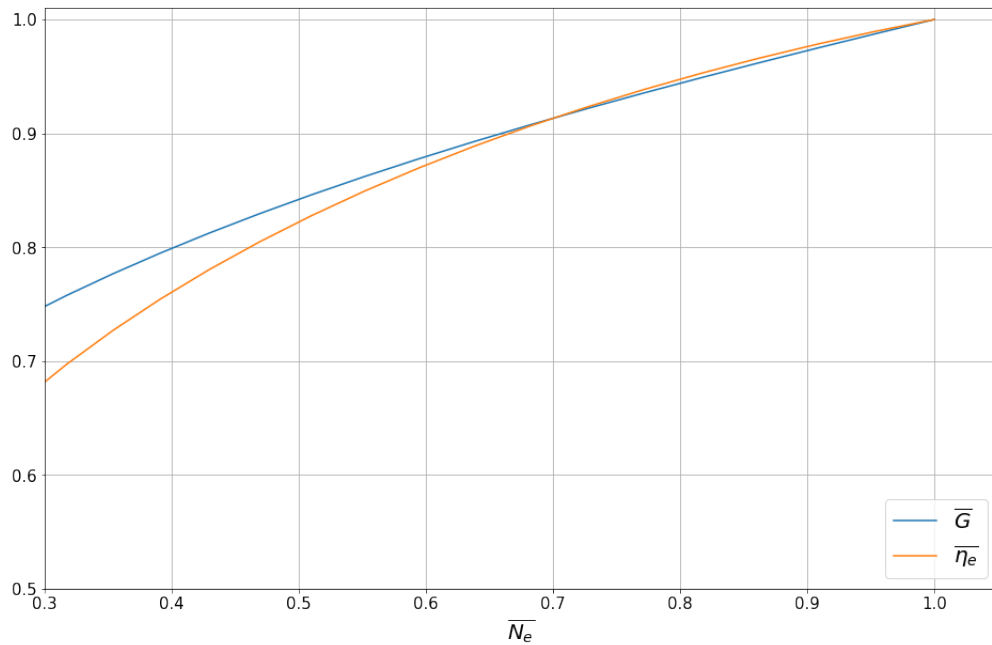


Рис. 0.6: Параметры цикла двухвальной регенеративной установки на режимах частичной мощности

Трехвальная схема представлена на рис. 0.7.

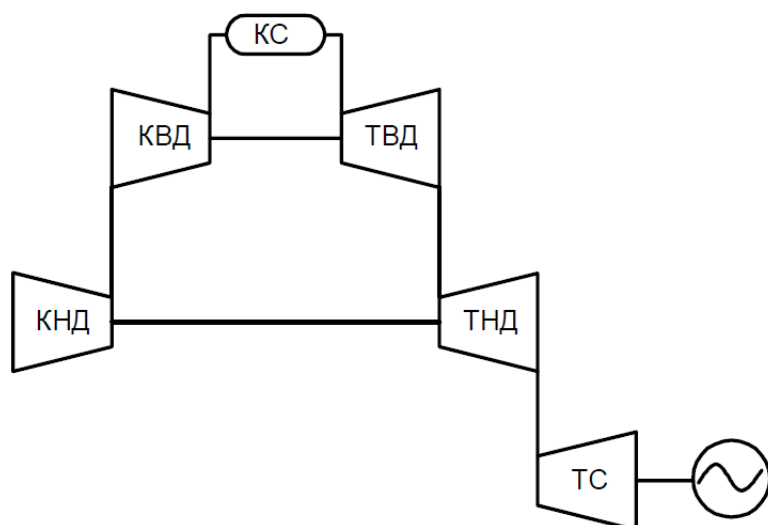


Рис. 0.7: Схема трехвальной установки (КНД – компрессор низкого давления, КВД – компрессор высокого давления, КС – камера сгорания, ТВД – турбина высокого давления, ТНД – турбина низкого давления, ТС – силовая турбина)

Параметры, характерные для трехвальной установки, представлены в табл. 0.7.

Таблица 0.7: Параметры трехвальной схемы

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Адиабатический КПД компрессора низкого давления	$\eta_{\text{КНД}}^*$	-	0,84
Адиабатический КПД компрессора высокого давления	$\eta_{\text{КВД}}^*$	-	0,86
КПД турбины низкого давления	$\eta_{\text{ТНД}}^*$	-	0,90
КПД турбины высокого давления	$\eta_{\text{ТВД}}^*$	-	0,88
КПД силовой турбины	$\eta_{\text{ТС}}^*$	-	0,92

Продолжение таблицы 0.7

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Номинальная частота вращения вала высокого давления	$n_{0ВД}$	об/мин	12000
Номинальная частота вращения вала низкого давления	$n_{0НД}$	об/мин	9500

Параметры цикла трехвальной установки на номинальном режиме представлены на рис. ??.

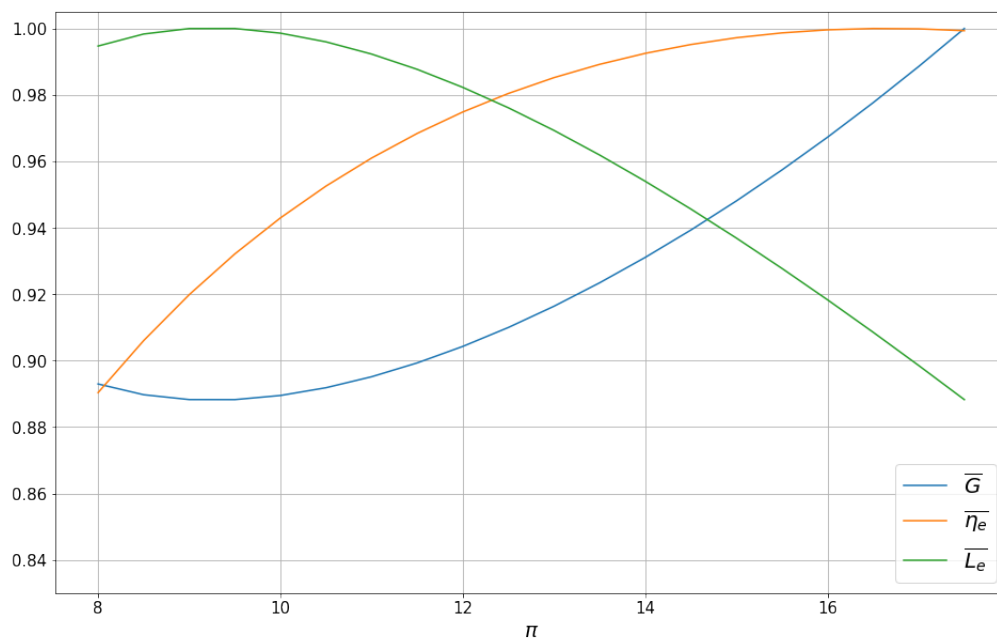


Рис. 0.8: Параметры цикла двухвальной безрегенеративной установки на номинальном режиме

В точке, соответствующей максимальному КПД установка имеет параметры, указанные в табл. 0.8.

Таблица 0.8: Параметры трехвальной установки в точке, соответствующей максимальному КПД

π_k	L_e , МДЖ/кг	η_e	G_B , кг/с
22,0	0,279	0,392	57,4

В точке, соответствующей максимальной удельной работе установка имеет параметры, указанные в табл. 0.9.

Таблица 0.9: Параметры трехвальной установки в точке, соответствующей максимальной удельной работе

π_k	L_e , МДЖ/кг	η_e	G_B , кг/с
11,0	0,315	0,321	50,8

В качестве расчетной выбирается точка, соответствующая максимальному КПД.

Параметры двухвальной безрегенеративной схемы представлены на рис. 0.9.

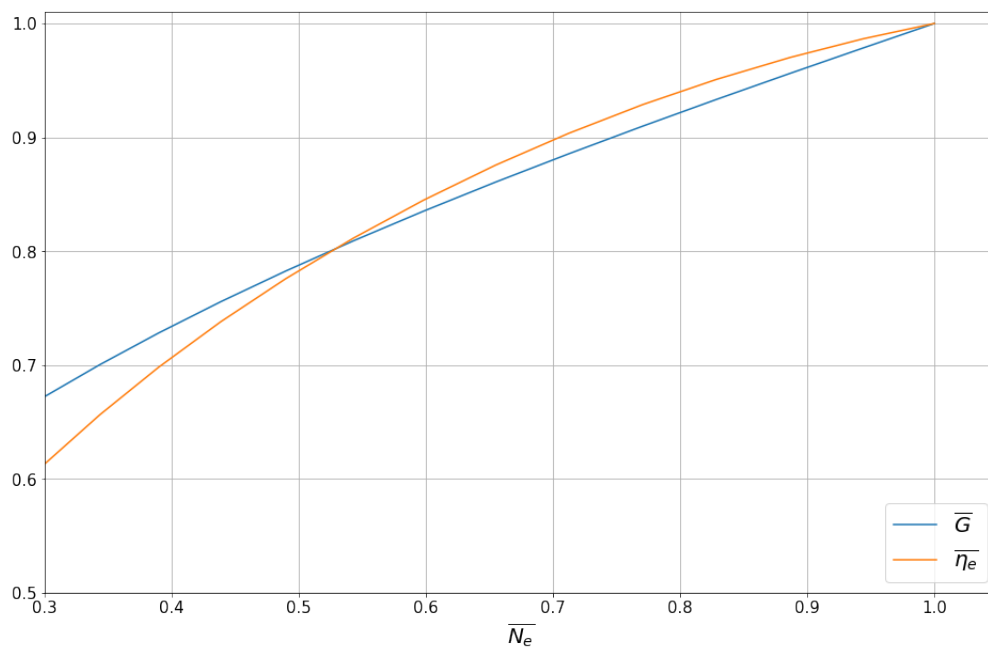


Рис. 0.9: Параметры цикла трехвальной установки на режимах частичной мощности

0.1.5 Анализ полученных данных

Сравним КПД установок на режимах частичной мощности. Для этого построим зависимости на одном графике зависимости КПД от мощности установки (рис. 0.10). Для удобства отнесем все значения к максимальному КПД из всех установок (номинальному КПД двухвальной регенеративной схемы).

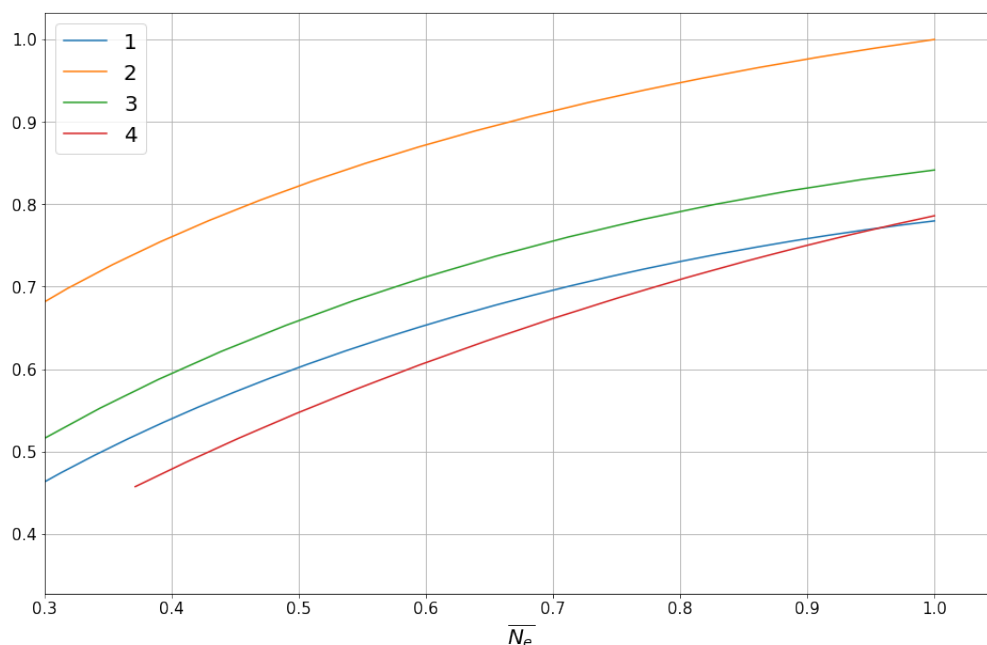


Рис. 0.10: Сравнение абсолютных КПД установок (1 – двухвальная безрегенеративная схема, 2 – двухвальная регенеративная схема, 3 – трехвальная схема)

Из полученного графика видно, что на всех режимах наиболее эффективным с точки зрения использования топлива является регенеративная схема. Также достоинством данной схемы является снижение удельной работы при снижении мощности установки. Благодаря этому расход в регенеративной схеме по мере уменьшения мощности падает медленнее, чем в безрегенеративной. Однако применение данной схемы приводит к существенному утяжелению установки и увеличению ее инертности, что крайне нежелательно в случае

привода ГПА.

Переход от двухвальной к трехвальной схеме приводит к увеличению КПД установки, за счет увеличения КПД компрессоров и турбин, которые работают при меньшей нагрузке, чем в случае двухвальной схемы. Однако область более высокого КПД сдвигается вправо по суммарной степени повышения давления в установке. В связи с этим предполагаемый рост КПД может быть нивелирован увеличением потерь в радиальном зазоре лопаток КВД и ТВД.

Тем не менее, разработка приводов ГПА мощностью 16 МВт по данной схеме вполне оправдана, так как в этом случае размеры лопаток ТВД и КВД оказываются не меньше нескольких десятков миллиметров.

0.1.6 Заключение

В данной исследовании был проведен сравнительный анализ трех схем привода ГПА на 16 МВт: двухвальная безрегенеративная схема, двухвальная регенеративная схема, трехвальная схема. Были рассмотрены термодинамические параметры этих схем как на номинальном режиме, так и на режимах частичной мощности.

Использование регенеративной двухвальной схемы позволило сильно увеличить КПД установки по отношению к безрегенеративному варианту (с 0.325 до 0.419) при уменьшении степени сжатия (с 16.5 до 9.5), что положительно сказывается на КПД лопаточных машин высокого давления. Однако применение регенеративной схемы связано с серьезным увеличением капитальных затрат на производство установки. В связи с этим использование данной схемы в качестве привода ГПА кажется нецелесообразным.

Было показано, что переход к трехвальной схеме позволяет повысить КПД установки (с 0.325 до 0.351) при слабом снижении расхода воздуха (с 59.2 до 57.4 кг/с).

1 Список литературы

1. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Хвацкий К.К. Длительная прочность никелевых сплавов для монокристаллических лопаток газотурбинных установок // Журнал «Конверсия в машиностроении». - 2005. - №3.
2. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / Иванов В. Л., Леонтьев А. И., Манушин Э. А., Осипов М. И. ; ред. Леонтьев А. И. - 2-е изд., стер. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. - 591 с. : ил. - Библиогр.: с. 576-577. - ISBN 5-7038-2138-X.
3. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.