

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЗАМКНУТЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ КОНТУРОВ

В течение ряда лет в России и за рубежом ведутся разработки перспективных турбогенераторных (ТГ) источников электрической энергии на основе замкнутого газотурбинного контура Брайтона. Особенно интенсивно разработки проводились для применения этих источников в составе систем электроснабжения космических аппаратов (СЭС КА).

Однако для определения возможности применения ТГ источников необходимо определить способы их регулирования и стабилизации заданных выходных величин. С этой целью ниже произведён анализ электромагнитных процессов в указанной турбогенераторной системе с учетом ее использования в составе КА. Показаны также возможные варианты построения необходимых регуляторов.

Основные положения, из которых вытекают требования к построению систем регулирования рассматриваемых турбогенераторных источников энергии, состоят в следующем.

Замкнутый газотурбинный контур не имеет элементов, регулирующих постоянный тепловой поток энергии, поступающий в турбину, поэтому стабилизация частоты вращения турбогенератора может осуществляться только путем регулирования момента на его валу, т. е.

$$M_t(\omega) - M_g(\omega) = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $M_t$  и  $M_g$  - моменты турбины и генератора соответственно;  $J$  - момент инерции системы турбина-компрессор-генератор;  $\omega$  - угловая частота вращения системы.

Таким образом, регулируя момент на валу ТГ, можно увеличивать или уменьшать его частоту вращения. Из вышеизложенного следует, что для поддержания частоты вращения стабильной, ТГ должен работать в режиме постоянства мощности.

При построении системы регулирования частоты вращения ТГ следует учитывать форму механических характеристик турбины

$M_T(\omega)$  и генератора  $M_G(\omega)$ , чтобы обеспечить статическую устойчивость системы, т. е.

$$\frac{d(M_T(\omega) - M_G(\omega))}{d\omega} < 0.$$

Изменение момента на валу ТГ в функции частоты вращения будет определяться характером электрических нагрузок, которые к нему подключены.

При работе турбогенераторов необходимо обеспечивать компенсацию их кинетических моментов, которые возникают в процессе разгона и при переходных процессах изменения частоты вращения, т.е.

$$\sum_{k,i} J_k \omega_i = 0,$$

где  $J_k$  - момент инерции  $k$ -го генератора;  $\omega_i$  - частота вращения  $k$ -го генератора.

В противном случае произойдет «закручивание» КА. Из этого требования следует, что ТГ должны работать парами, которые вращаются синхронно в противоположные стороны. Это можно легко выполнить, если два синхронных генератора будут включены параллельно и будут работать на общие шины. Однако при этом возникает вопрос равномерного деления между ними реактивной нагрузки.

Одна из особенностей замкнутого теплового контура состоит в том, что для его запуска необходимо предварительно разогнать турбину и компрессор до заданной частоты вращения специальным двигателем (стартером), получающим питание от независимого источника энергии.

Роль стартера должен выполнять ТГ, который в этом случае должен работать в режиме асинхронного двигателя, обеспечивая разгон системы по заданному графику, до заданной частоты вращения. После чего ТГ из асинхронного режима работы должен быть переведен в режим работы синхронного двигателя, а затем синхронного генератора.

Турбогенераторные источники должны также обеспечивать необходимое качество электрической энергии, определяемое соответствующими ГОСТами и ОСТАми, а также возможность работы на выпрямительную нагрузку и перегрузки, определяемые возможностями теплового контура. Турбогенератор должен иметь КПД в пределах 0,90 - 0,95, выдерживать короткие замыкания в течение заданного промежутка времени при условии гашения его поля и иметь ресурс работы порядка 10 лет.

Перечисленные требования определяют круг, рассматриваемых ниже вопросов:

- стабилизацию частоты вращения ТГ, определяющую точность поддержания их выходного напряжения;
- стабилизацию выходной величины напряжения генераторов;
- обеспечение равномерного деления реактивных токов между параллельно включенными генераторами;
- использование ТГ в режиме асинхронных двигателей и перевод их в режим синхронных генераторов.

Подробный вывод передаточной функции ТГ необходимой для построения системы стабилизации частоты вращения приведен в [1].

Мощности турбогенераторов в рассматриваемых системах должны составлять не менее чем 25 кВт в единице, что по данным многих исследований и в том числе [2, 3] является той мощностью, при которой замкнутый газотурбинный контур становится эффективным.

Существует большое количество типов генераторов, которые можно было бы применить в этих системах. Среди них генераторы с постоянными магнитами и электромагнитным возбуждением, а также комбинированные с постоянными магнитами и дополнительными обмотками возбуждения для регулирования напряжения генератора, явнополусные и неявнополусные, с контактными кольцами и без них, с внешнезамкнутым потоком, с клювообразными роторами и ряд других. Выбор типа генератора представляет самостоятельную задачу, которая была неоднократно проделана рядом исследователей.

В результате было установлено, что наиболее подходящим генератором является обращенный генератор с клювообразным ротором с электромагнитным возбуждением [4].

В соответствии с требованиями, изложенными выше, у ТГ должны быть стабилизированы одновременно три выходные координаты: активная мощность, выходное напряжение и частота вращения. Для регулирования потребления активной мощности на выходе генератора должны применяться устройства сброса избыточной мощности, которые, в зависимости от потребления полезной мощности от ТГ, должны подключать или отключать балластные нагрузки.

Для регулирования частоты вращения ТГ используются эти же устройства, с помощью которых, регулируя отбираемую от генератора мощность, можно регулировать момент на его валу и в соответствии с равенством (1) ускорять или замедлять частоту его вращения.

Сложность стабилизации указанных выше выходных координат заключается в том, что все они взаимосвязаны между собой и изменение одной из них приводит к изменению двух других.

Изменение момента на валу ТГ в функции частоты вращения будет определяться характером электрических нагрузок, которые к нему подключены.

В процессе регулирования частоты напряжения ТГ следует учитывать известные положения о влиянии характера изменения активной мощности нагрузки в функции частоты напряжения генератора. В общем виде для всех существующих видов полезных нагрузок эта зависимость выглядит следующим образом:

$$P_n = P_0 + P_1 (f/f_{ном}) + P_2 (f/f_{ном})^2 + P_3 (f/f_{ном})^3 + P_4 (f/f_{ном})^4, \quad (2)$$

где  $P_n$  - полная мощность нагрузки,  $f_{ном}$  - номинальная выходная частота ТГ.

Составляющие полной мощности нагрузки характеризуют потребители, имеющих следующие виды нагрузок:  $P_0$  - резистивную;  $P_1$  - поршневые насосы и компрессоры;  $P_2$  - потери в сетях;  $P_3$  и  $P_4$  - центробежные насосы при малом и большом напоре соответственно.

Из (2) следует, что при уменьшении частоты питающего напряжения полная мощность нагрузки будет снижаться. При дефиците двигательной мощности турбины снижается её частота вращения, однако одновременно с этим снижается и мощность нагрузки. В результате равновесие мощностей турбины и нагрузки наступает при новой более низкой частоте вращения. Таким образом, проявляется регулирующий эффект нагрузки, который характеризуется коэффициентом нагрузки

$$k_n = \left( \frac{\partial P_n^*}{\partial f_n^*} \right)_{f=f_{ном}}, \quad (3)$$

где  $P_n^*$  и  $f_n^*$  — относительные значения мощности и частоты.

В существующих промышленных электроэнергетических системах величина  $k_n$  составляет 1,5 - 2,0 [5]. Регулирующий эффект нагрузки облегчает регулирование частоты вращения генератора, уменьшая снижение частоты при дефиците мощности турбины.

Системы электроснабжения с турбогенераторными источниками энергии также будут характеризоваться какими-то величинами коэффициента нагрузки, однако определить его в настоящее время сложно. В режиме работы, когда полезная нагрузка отсутствует и к генератору подключена только балластная, т.е. нагрузка носит ре-

зистивный характер,  $P_0 = P_6$ , где  $P_6$  – мощность резистивной балластной нагрузки. В соответствии с (3)  $k_H = 0$ .

Это положение является наиболее неблагоприятным с точки зрения самовыравнивания системы. Проиллюстрируем это с помощью рис. 1, на котором приведены приближенные зависимости мощности турбины от частоты ее вращения при постоянном количестве вводимого рабочего тела  $P_T(f)$  [5].

Приведенные на рис.1 кривые соответствуют трем разным количествам рабочего тела, находящегося в тепловом контуре. На этом же рисунке показаны кривые  $P_H(f)$  мощности нагрузки в функции частоты для случаев  $k_H > 0$  и  $k_H = 0$  (пунктирные линии). Заметим, что если нагрузка получает питание непосредственно от ТГ, то их мощности с точностью до потерь в генераторе совпадают. Следовательно, кривые мощности нагрузки  $P_H(f)$  являются кривыми мощности, отдаваемой генератором.

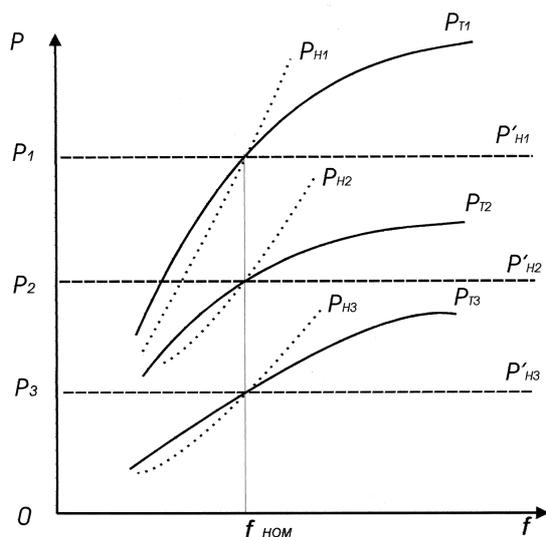


Рис. 1. Изменение мощности турбины и нагрузки от частоты вращения

В окрестностях точек равновесия (см. рис.1), при небольших отклонениях от них, кривые зависимости мощности  $P$  от частоты  $f$  будут примерно соответствовать зависимостям момента  $M$  от угловой частоты вращения  $\omega$ . По знаку разности моментов турбины и нагрузки, при отклонениях частоты от точки равновесия, можно судить об устойчивости системы.

Из представленных кривых следует, что при  $k_n > 0$  в точках статического равновесия (пересечения кривых  $P_T(f)$  и  $P_H(f)$ ) система «генератор-турбина» будет устойчивой, а для случаев  $k_n = 0$  неустойчивой. Последнее означает, что если форма характеристик турбины будет соответствовать форме характеристик, представленных на рис.1, и ТГ будет включен на балластную нагрузку, система «турбина-генератор» не будет обладать свойством самовыравнивания. В этом случае стабилизация частоты вращения этой системы с помощью автоматического регулирования будет затруднена.

Двигательный момент, развиваемой турбиной при постоянном тепловом потоке может быть выражен в функции угловой частоты вращения  $\omega$  как  $M_T(\omega)$ . Тормозной момент, обусловленный нагрузкой ТГ, может быть выражен как  $M_r(\omega, P)$  в функции угловой частоты вращения  $\omega$  и входного возмущающего воздействия  $P$ .

Анализ системы целесообразно проводить в окрестности рабочих точек  $\omega_n, P_n$  для приращения координат  $\Delta\omega$  и  $\Delta P$ . С учетом вышеизложенного, получим следующие линеаризованные зависимости действующих в системе моментов

$$\Delta M_T = \left( \frac{\partial M_T(\omega)}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_n} \cdot \Delta\omega,$$

$$\Delta M_r = \left( \frac{\partial M_r(\omega, P)}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_n} \cdot \Delta\omega + \left( \frac{\partial M_r(\omega, P)}{\partial P} \right)_{\omega=\omega_n} \cdot \Delta P.$$

Записав уравнение (1) в приращениях и подставив в него предшествующие выражения [1], получим передаточную функцию звена «турбина - генератор»

$$W_{ТГ}(p) = \frac{v(p)}{\mu(p)} = \frac{1}{T_m p + \lambda},$$

где  $T_m = J\omega_n/M_n$  - механическая постоянная времени;  $v = \Delta\omega/\omega_n$  - относительное значение частоты вращения;  $\mu = \Delta M/M_n$  - относительное значение возмущающего момента;  $\lambda$  - коэффициент самовыравнивания.

Эта функция показывает каким будет перепад частоты вращения турбины при изменении момента нагрузки. Она отражает поведение турбины и генератора при изменениях мощности нагрузки, она представлена также на рис. 2 в виде звена на структурной схеме и является интегрирующим звеном, охваченным обратной свя-

зью с коэффициентом  $\lambda$ , который характеризует способность системы возвращаться в точку статического равновесия.

На рис. 2 обозначены:  $i_{3z}$ ,  $i_{\Delta z}$  и  $\Delta i_z$  - сигналы токов соответственно заданного, действительного и ошибки регулирования;  $i_n$ ,  $i_{\delta}$ ,  $i_z$  - сигналы токов соответственно нагрузки, балластных резисторов и ТГ;  $\omega_{3z}$ ,  $\omega_{\Delta z}$  и  $\Delta \omega_z$  - сигналы частот вращения соответственно заданной, действительной и ошибки регулирования;  $u_y$  - сигнал управления блока балластных нагрузок;  $M$  - момент на валу ТГ;  $U_T$  - напряжение ТГ;  $g$  - проводимость блока балластных нагрузок;  $k_g$  и  $k_{ТГ}$  - коэффициенты соответственно блока балластных нагрузок и ТГ;  $\lambda$  - коэффициент самовыравнивания;  $k_{ост}$ ,  $k_{оч}$  - коэффициенты обратной связи по току и частоте вращения;  $T_B$ ,  $T_T$  и  $T_M$  - постоянные времени соответственно блока балластных нагрузок, статорной обмотки и механическая ТГ;  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$  - постоянные времени регулятора частоты вращения;  $k_m \Phi$  - произведение конструктивной постоянной на магнитный поток ТГ.

В зависимости от характера нагрузки турбогенератора коэффициент  $\lambda$  может принимать положительные или отрицательные значения в зависимости от коэффициента нагрузки генератора  $k_n$ , определяющего знак  $\lambda$ . В случае отрицательного значения  $\lambda$  звено, описывающее турбогенератор, становится неустойчивым. Как известно статически неустойчивый объект может быть элементом системы автоматического регулирования, однако для обеспечения устойчивости системы в целом необходимо принимать специальные меры.

Для построения САР необходимо также иметь математическое описание звена, с помощью которого осуществляется регулирование активной составляющей тока нагрузки генератора и частоты его вращения, т.е. блока балластных нагрузок.

Для получения этого описания, в начале необходимо рассмотреть возможные варианты реализации этих блоков.

Возможные технические решения представлены на рис. 3. С помощью схемы *a*) может быть получено плавное регулирование тока нагрузки генератора от максимального значения до нуля. Отрицательной стороной указанного устройства является то, что одновременно с изменением активной составляющей тока генератора изменяется также и сдвиг по фазе его первой гармоники относительно напряжения.

Учитывая, что генератор допускает протекание только определенной, ограниченной составляющей реактивного тока ( $\cos \varphi \geq 0,8$ ), очевиден недостаток этого вида устройств. Помимо этого устройства будут генерировать высшие гармоники, что приведет к иска-

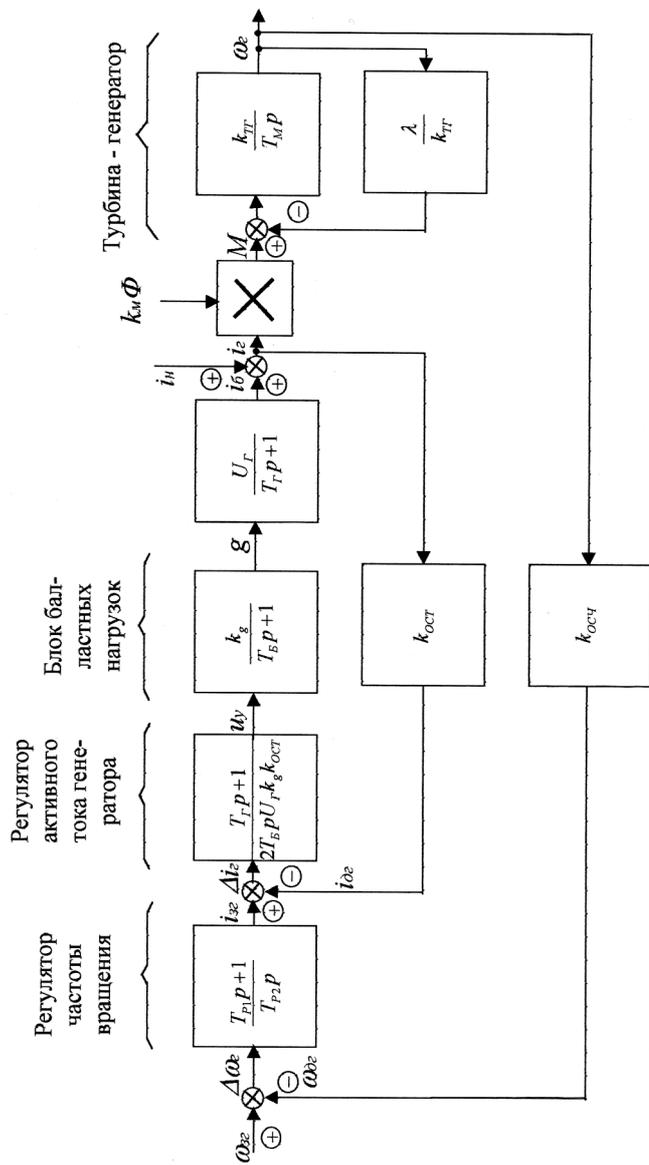
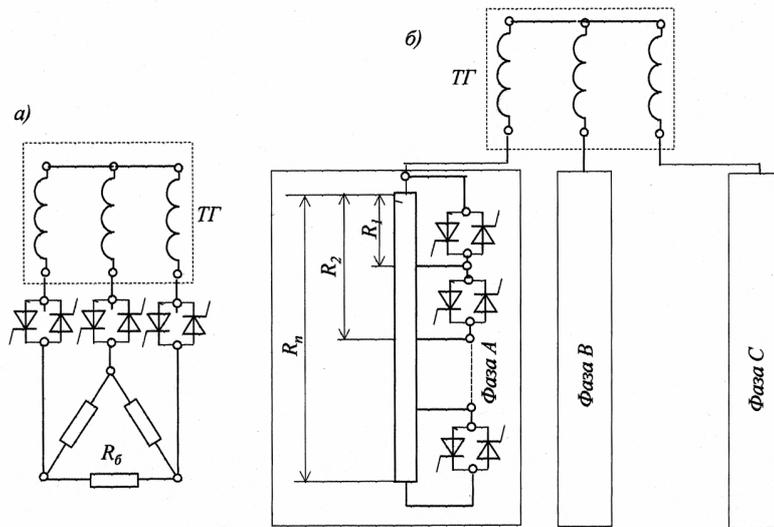


Рис. 2. Структурная схема системы регулирования частоты вращения

жению синусоидальной формы напряжения на выходе генератора. В связи с этим их использование должно сопровождаться применением фильтров и устройств компенсации реактивной мощности.

Устройство по схеме рис.3,б лишено указанных выше недостатков, однако регулирование тока генератора с его помощью может производиться только ступенями.



**Рис. 3. Устройства регулирования балластной нагрузки**

В рассматриваемых устройствах тиристоры коммутуют переменный ток и могут отключаться только через полпериода после снятия сигнала с их управляющих электродов. За это время их ток обязательно пройдет через нулевое значение.

Таким образом, рассматриваемое звено характеризуется запаздыванием в половину периода. С достаточной степенью точности его можно считать аperiодическим с постоянной времени  $T_B$  равной половине периода изменения напряжения генератора. Передаточным коэффициентом этого звена будет коэффициент  $k_g$  равный отношению величины проводимости  $g$  на его выходе к величине управляющего входного сигнала  $u_y$ .

Располагая передаточными функциями описанных выше элементов, может быть построена САР частоты вращения ТГ на основе следующих положений. Активная составляющая тока нагрузки

ТГ, равная сумме токов полезной и балластной нагрузок, всегда должна быть равна заданной величине активного тока нагрузки ТГ. В случае несоответствия указанных величин, должна производиться коррекция тока нагрузки генератора путём воздействия на устройство балластных нагрузок.

Для реализации этого необходимо измерять активную составляющую тока генератора и сравнивать ее с заданным значением активной составляющей тока. Частота вращения ТГ должна регулироваться путем измерения действительного и заданного значений этой величины, сравнения их между собой и формирования по их отклонению заданного значения активного тока. В случае отрицательного значения  $\lambda$  звено, описывающее турбогенератор, становится неустойчивым. Однако известно, что статически неустойчивый объект может быть элементом системы автоматического регулирования.

Устойчивость системы в целом в этом случае обычно достигается с помощью применения пропорционально-интегральных или пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов и соответствующего подбора параметров этих регуляторов.

Вариант структурной схемы САР, реализующей указанные выше положения, приведен на рис. 2 и представляет собой двухконтурную систему регулирования. Он не является проектом конкретного регулятора, а лишь показывает возможность его построения.

Предложенная система стабилизации частоты вращения будет работоспособной также при изменении количества рабочего тела в тепловом контуре. В этом случае произойдет изменение заданного значения тока ТГ, что приведет к изменению мощности генератора в соответствии с изменением мощности теплового контура, а его частота вращения при этом останется неизменной.

Как указывалось выше, активная мощность на выходе генератора должна быть постоянной, т.е.

$$P=3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi = \frac{3U_{\phi}E_{\phi}}{x_c}\sin\theta, \quad (4)$$

где  $P$  - активная мощность трехфазного генератора;  $U_{\phi}$  - фазное напряжение;  $E_{\phi}$  - фазная э.д.с холостого хода генератора;  $I_{\phi}$  - фазный ток;  $\cos\varphi$  - коэффициент мощности;  $x_c$  - синхронное сопротивление генератора;  $\theta$  - угол нагрузки равный углу между векторами  $\vec{U}_{\phi}$  и  $\vec{E}_{\phi}$ .

Из представленного выражения следует, что  $U_{\phi}$  и произведение  $I_{\phi}\cos\varphi$  должны быть постоянными величинами. Следовательно, и величина активной составляющей тока также должна быть неиз-

менной величиной. Однако, как известно, изменение полного тока синхронного генератора по модулю или фазе приводит к изменению выходного напряжения генератора. Для поддержания напряжения генератора постоянным нужно изменять его э.д.с  $E_\phi$ , воздействуя на ток в обмотке возбуждения генератора.

Изменение  $E_\phi$  в соответствии с формулой (4) должно вызвать изменение угла нагрузки  $\theta$ . Приведенный выше анализ иллюстрируется с помощью известных упрощенных векторных диаграмм синхронного генератора (рис. 4), где три различных вида нагрузок – активная, активно-емкостная и активно-индуктивная – соответствуют индексам 1, 2 и 3.

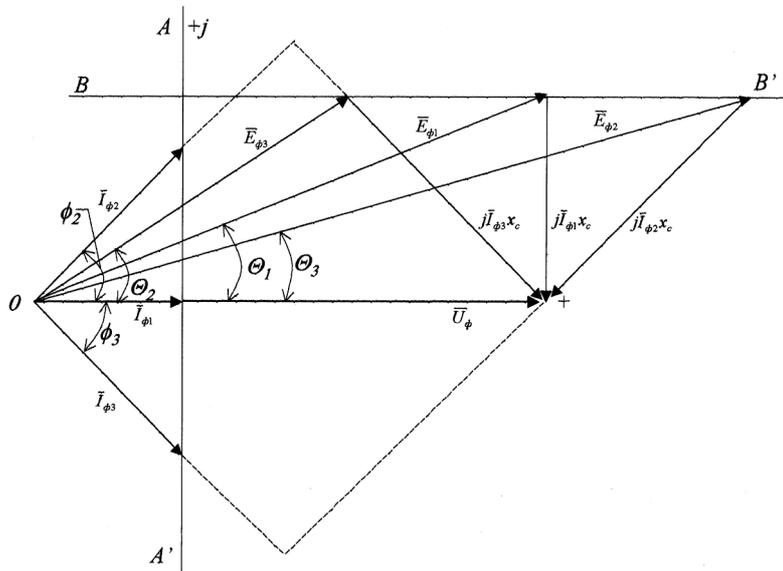


Рис. 4. Векторные диаграммы ТГ при различных видах нагрузки

Вертикальная линия  $AA'$  на векторной диаграмме, к которой из точки  $O$  направлены векторы токов, отражает условие постоянства потребления активной мощности и, следовательно, постоянства активной составляющей тока. Вследствие этого проекции векторов тока  $I_\phi$  на горизонтальную ось

$$I_{a\phi} = I_\phi \cos\varphi$$

одинаковы для всех векторов.

Горизонтальная линия  $BB'$  параллельная направлению вектора напряжения, является линией постоянства мощности генератора. К

этой линии из точки 0 направлены векторы э.д.с генератора  $\bar{E}_\phi$ . Сумма векторов э.д.с и падений напряжений в генераторе равна напряжениям на его выходе

$$\bar{U}_\phi = \bar{E}_\phi + j \bar{I}_\phi x_c .$$

Последнее равенство представлено на векторной диаграмме для трех значений угла  $\phi$  (направления действительной и мнимой осей указаны). Из приведенной векторной диаграммы следует, что в рассматриваемом случае на величину выходного напряжения ТГ влияет только реактивная составляющая тока нагрузки.

Проследим, каким образом отразится наброс нагрузки на поведении трех взаимосвязанных координат: напряжении, мощности и частоты вращения. При набросе полезной нагрузки должно сработать устройство сброса избыточной мощности и уменьшить балластную нагрузку, подключенную к генератору ровно настолько, на сколько увеличилась активная составляющая полезной нагрузки. Если этого не сделать, то произойдет снижение частоты вращения генератора.

В случае если подключенная полезная нагрузка была чисто активной, то после срабатывания устройства сброса избыточной мощности процесс закончится. При подключении смешанной нагрузки к генератору процесс работы системы будет иным. В начале, как и в предыдущем случае, должно произойти срабатывание устройства сброса избыточной мощности, в результате чего активная составляющая мощности должна остаться прежней.

Однако величина полной мощности станет иной, вследствие чего произойдет изменение угла сдвига тока генератора относительно напряжения. Это изменение должно быть парировано корректировкой величины э.д.с генератора, для чего в работу должен вступить регулятор его тока возбуждения. В результате оказываются взаимосвязанными между собой следующие величины: ток, угол сдвига тока относительно напряжения  $\phi$ , э.д.с  $E$ , угол нагрузки  $\theta$ .

Наиболее эффективный способ регулирования напряжения ТГ основан на применении астатического регулирования выходного напряжения генератора. С этой целью его обмотку возбуждения питают от мощного усилителя постоянного тока. Регулирование тока в обмотке возбуждения имеет некоторые особенности связанные с ее высокой индуктивностью. Прежде всего это определяет ее большую постоянную времени. Кроме того, индуктивный характер нагрузки приводит к тому, что в электромагнитном поле, создаваемом обмоткой, запасается большое количество энергии, которую в процессе регулирования необходимо либо пополнять, либо сбрасывать.

Это требование может быть выполнено с помощью усилителя мощности, рассчитанного на протекание тока, равного по величине номинальному току обмотки возбуждения ТГ. Величина выходного напряжения усилителя должна в несколько раз превышать номинальное напряжение обмотки возбуждения ТГ, т.е. должна быть обеспечена определенная кратность форсировки возбуждения турбогенератора

$$k_u = U_{в\ max} / U_{в\ ном},$$

где  $U_{в\ max}$  и  $U_{в\ ном}$  - соответственно максимальное и номинальное значения напряжения питания обмотки возбуждения.

Форсировка нарастания тока возбуждения ТГ позволяет обеспечить требуемое быстродействие регулирования напряжения ТГ. Поскольку время нарастания и спада тока возбуждения в процессе регулирования необходимо иметь одинаковым, форсировка должна быть обеспечена как при нарастании, так и при спаде тока возбуждения. Учитывая индуктивный характер нагрузки, это означает изменение полярности напряжения на выходе усилителя при сохранении направления тока. Последнее соответствует передаче энергии от обмотки возбуждения в источник питания, т.е. рекуперации.

Указанными выше свойствами обладают управляемые выпрямители, выполненные по симметричным схемам, а также некоторые виды широтно-импульсных преобразователей. Габаритная мощность этих устройств должна соответствовать номинальному току обмотки возбуждения и максимальному напряжению усилителя, т.е. должна быть в  $k_u$  раз больше мощности, потребляемой обмоткой возбуждения ТГ.

Таким образом, из предшествующего следует, что обмотка возбуждения ТГ должна получать питание от регулируемого силового усилителя и должна быть охвачена обратной связью по току. На рис. 5 приведен возможный вариант структурной схемы регулирования напряжения ТГ. Предложенный вариант, также как и другие структурные схемы рассмотренные ниже, не является проектом конкретного регулятора, а лишь показывает возможность реализации требуемых технических решений.

На рис. 5 обозначены:  $i_{зв}$ ,  $i_{дв}$ ,  $\Delta i$  - сигналы токов возбуждения соответственно заданного, действительного и ошибки регулирования;  $u_{зв}$ ,  $u_{дв}$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta u_k$  - сигналы напряжений ТГ соответственно заданного, действительного, ошибки регулирования и коррекции;  $u_{рег}$  - сигнал регулятора тока возбуждения;  $E_c$ ,  $U_c$ ,  $I_c$  - э.д.с., напряжение и ток ТГ;  $\Delta U_c$  - изменение величины напряжения ТГ при протекании тока;  $U_g$ ,  $I_g$  - напряжение и ток возбуждения генератора;  $k_{п}$ ,  $k_{т}$ ,

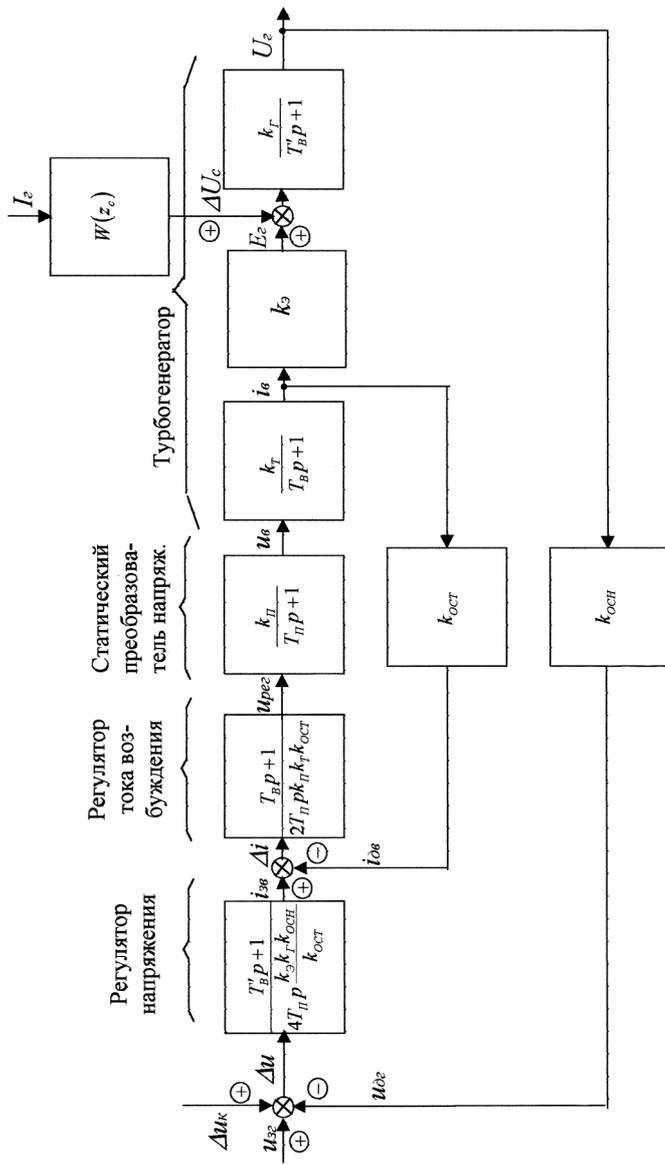


Рис. 5. Структурная схема регулирования напряжения ТГ

$k_э, k_г$  - коэффициенты соответственно преобразователя, тока, э.д.с. и ТГ;  $k_{о.с.т.}, k_{о.с.н.}$  - коэффициенты обратной связи соответственно по току и напряжению;  $T_B$  - постоянная времени, характеризующая нарастание тока и, соответственно, потока возбуждения генератора;  $T'_B$  - постоянная времени, представляющая собой сумму постоянных времени, обусловленных потоками рассеяния и процессами происходящими в демпфирующих контурах.

Принципиальными вопросами построения САР частоты вращения и напряжения ТГ является их взаимное влияние друг на друга. Это проявляется следующим образом. При работе регулятора напряжения происходят изменения потока возбуждения генератора  $\Phi$  в результате чего изменяется величина момента на валу турбогенератора  $M$ . Это вызывает изменение скорости отработки возмущающих воздействий. В схеме на рис. 2 это отображается в виде изменения коэффициента  $k_{M\Phi}$ .

В свою очередь изменение частоты вращения генератора  $\omega_г$ , вызванное работой регулятора частоты вращения, приведет к изменению величины его э.д.с  $E$ . На структурной схеме рис. 5 это повлияет на величину коэффициента  $k_э$ . Таким образом изменение частоты вращения заставит регулятор напряжения отработать это возмущение и восстановить прежнее значение напряжения генератора. Чтобы свести к минимуму взаимное влияние регуляторов ТГ, следует выполнять один из них более быстродействующим, чем другой.

Регулирование частоты вращения ТГ, рассмотренное выше, относилось к одному генератору. В действительности генераторы должны работать параллельно на общие шины, и, как минимум, таких параллельно работающих генераторов должно быть два. Распределение активной нагрузки между генераторами и, следовательно, активных токов между ними определяется механической мощностью турбин, приводящих их во вращение.

Однако в рассматриваемом случае, при параллельном включении генераторов на общие шины, одновременно оказываются подключёнными к ним и их балластные нагрузки. Вследствие этого при воздействии на один из блоков балластных нагрузок изменяются активные составляющие токов всех параллельно включённых генераторов.

Для регулирования частоты вращения параллельно включенных генераторов их следует рассматривать как единый генератор с общей нагрузкой. Соответственно полная мощность резисторов балластных нагрузок должна быть рассчитана на все генераторы, включенные на параллельную работу.

Как известно, распределение реактивной нагрузки между генераторами зависит от соотношения величин их токов возбуждения, которые определяют величины их э.д.с. Изменяя токи возбуждения параллельно включенных генераторов, можно перераспределять реактивные токи потребляемые от них. При перевозбуждении генератора величина его реактивного тока (отстающего по фазе от его напряжения) возрастает. При недовозбуждении генератора он начинает потреблять реактивный ток, опережающий по фазе его напряжение.

Поскольку увеличение или уменьшение токов возбуждения генераторов эквивалентно соответствующему изменению их э.д.с, то, следовательно, для выравнивания реактивных токов нужно воздействовать на их регуляторы напряжения. С этой целью у регулятора напряжения (см. рис. 5) предусмотрен специальный вход, на который подается корректирующий сигнал  $\Delta u_k$ .

Формирование сигналов  $\Delta u_k$  для двух параллельно работающих генераторов ТГ1 и ТГ2 показано на рис. 6, а. В соответствии с этим рисунком производится измерение реактивных токов указанных генераторов, которые преобразуются в сигналы  $I_{P1}^*$  и  $I_{P2}^*$ . Затем производится сравнение этих сигналов и их разность поступает на входы регуляторов напряжения P1 и P2.

Если, например, окажется, что реактивный ток ТГ1 больше, чем реактивный ток ТГ2, то сигнал пропорциональный их разности  $\Delta u_k$  поступит на входы регуляторов P1 и P2. Знак сигнала воздействия должен быть таким, чтобы вызвать уменьшение тока возбуждения того генератора, у которого реактивный ток больше, и увеличение тока возбуждения того генератора, у которого реактивный ток меньше.

Указанный способ выравнивания токов может быть распространен на  $n$  генераторов (рис. 6, б). В соответствии с этим рисунком производится сравнение реактивных токов каждого последующего по номеру генератора и предыдущего, а сигнал пропорциональный их разности подаётся на вход предыдущего генератора. В результате образуется кольцо регулирования, по которому перемещается регулирующее воздействие, до тех пор пока не произойдет выравнивание всех реактивных токов генераторов.

Второй способ выравнивания реактивных токов генераторов состоит в следующем:

- измеряются реактивные токи  $n$  генераторов с помощью специальных датчиков реактивных токов;
- определяется среднее значение реактивных токов  $I_p$   $n$  генераторов

$$i_{pc} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_{pk}$$

- сигнал пропорциональный среднему значению реактивного тока генератора используется в качестве эталона, с которым срав-

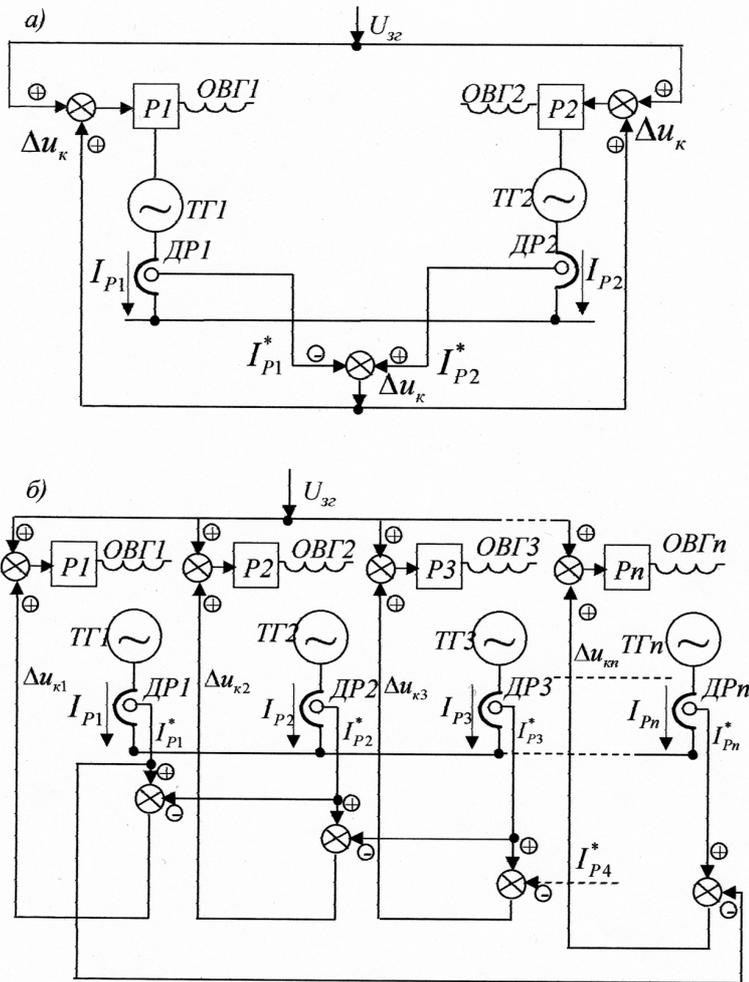


Рис. 6. Регуляторы деления реактивных токов генераторов

ниваются сигналы пропорциональные реактивным токам отдельных генераторов

$$\Delta I = I_{pc} - I_{pk};$$

- в зависимости от знака сигнала отклонения реактивного тока от среднего значения производится воздействие на регулятор напряжения соответствующего генератора.

Возможен и другой способ включения ТГ на параллельную работу. Напряжение ТГ можно предварительно выпрямить и затем постоянное напряжение включить на общие шины. В этом случае окажется необходимым обеспечить синхронизацию частот вращения турбогенераторов. Необходимо будет также обеспечить деление нагрузки между генераторами на постоянном токе из-за неизбежного различия их статических вольт-амперных характеристик. Указанные причины вызовут необходимость применить два дополнительных регулятора: синхронизации частот вращения и деления токов нагрузки.

Необходимо также отметить, что применение выпрямителей вызовет дополнительные потери в вентилях, увеличит необходимую габаритную мощность источника переменного тока, которая определяется схемой выпрямления. В самом благоприятном случае при использовании трехфазной мостовой схемы выпрямления это увеличение составит 5%.

В процессе работы выпрямителей будут возникать искажения напряжения источника переменного тока связанные с протеканием по его обмоткам высокочастотных гармоник. Последнее положение приведет к дополнительному нагреву ТГ.

Запуск теплового контура может производиться, как это указывалось выше, с помощью турбогенератора, используя его способность работать в режиме асинхронного двигателя. Примерный вид механических характеристик ТГ в этом режиме показан на рис.7.

Важным вопросом в этом процессе является переход ТГ из асинхронного режима работы в синхронный режим. Как известно [6], процесс вхождения в синхронизм осуществляется тем легче, чем меньше начальное скольжение ротора  $S_{вх}$  относительно вращающегося поля статора. Эта величина определяет различие в частотах вращения поля машины и ее ротора и, следовательно, ту величину на которую нужно увеличить скорость ротора, чтобы он «догнал» поле статора.

Для обеспечения вхождения в синхронизм должно быть выполнено следующее условие

$$S_{\text{вх}} < 4,06 \sqrt{\frac{M_{\text{с max}}}{J\omega_0 f}},$$

где  $M_{\text{с max}}$  - максимальный синхронный момент, развиваемый двигателем, при его вхождении в синхронный режим работы;  $J$  - момент инерции ротора;  $\omega_0$  - угловая частота вращения поля статора;  $f$  - частота питающего напряжения.

Как следует из рис.7, механические характеристики ТГ, работающего в режиме асинхронного двигателя, весьма неблагоприятны для вхождения в синхронный режим. Величина  $S_{\text{вх}}$  будет большой даже при небольшом моменте на валу асинхронного двигателя при его вхождении в синхронизм. В соответствии с (5) преодолеть это можно или путем увеличения момента  $M_{\text{с max}}$  или путем понижения частоты  $f$  в момент вхождения двигателя в синхронизм.

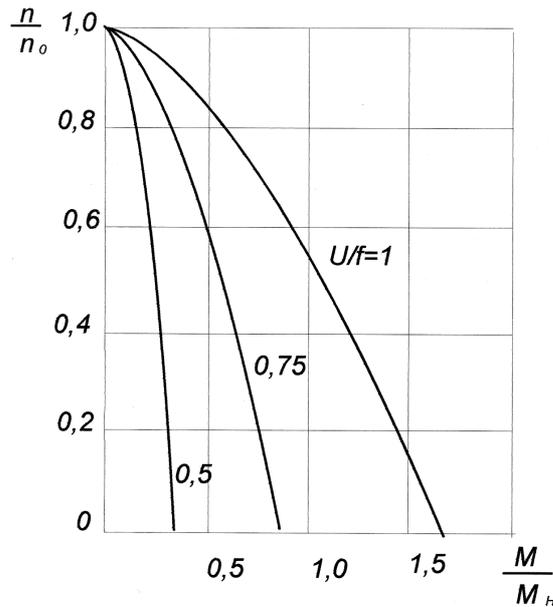


Рис. 7. Механические характеристики ТГ, работающего в режиме асинхронного двигателя, при различных сочетаниях напряжений и частот питания

Для увеличения синхронизирующего момента можно форсированно повысить ток возбуждения ТГ. Однако следует учитывать, что возможность увеличения момента в этом случае ограничивает-

ся насыщением магнитной системы электрической машины. Более широкие возможности в этом случае возникают при понижении частоты питающего напряжения  $f$ . Реализовать это можно путем использования регулируемого частотного преобразователя.

Таким образом, возникают два возможных варианта разгона ТГ. Прямой пуск от нерегулируемого частотного преобразователя с ограничением величины пускового тока и форсировкой возбуждения при вхождении в синхронный режим работы или частотный пуск от регулируемого частотного преобразователя с понижением частоты питающего напряжения во время вхождения двигателя в синхронизм.

Оба способа требуют применения специального оборудования, имеют преимущества и недостатки. Помимо этого важной характеристикой процесса запуска теплового контура является количество электроэнергии, потребное для его осуществления. Это определяет ее необходимый запас в аккумуляторных батареях с учетом возможности трех повторных запусков. В связи с вышеизложенным, вопрос о применении вида разгона должен решаться на стадии системных исследований СЭС с применением тепловых контуров.

### **Выводы**

1. В автономных ТГ установках на основе замкнутого газотурбинного контура с постоянной мощностью теплового потока возможна неустойчивая работа системы при перераспределении мощности генератора между балластными и полезными нагрузками.

2. Стабилизация частоты вращения ТГ в рассматриваемой системе должна осуществляться с учетом формы механических характеристик турбины и суммарной нагрузки генератора путем выбора передаточной функции регулятора частоты вращения ТГ и подбора величин ее коэффициентов.

3. В качестве блока балластных нагрузок, предназначенных для поддержания постоянной мощности на выходе ТГ, целесообразно применять нагрузочные устройства, позволяющие потреблять от него только активную составляющую нагрузочного тока и не искажающих его выходное напряжение.

4. При параллельном включении ТГ на общие шины, с целью компенсации их кинетических моментов, должен использоваться общий блок балластных нагрузок, а для равномерного деления реактивных токов, параллельно включенных генераторов необходимо применить регулятор деления реактивных токов.

5. Разгон ТГ в режиме асинхронного двигателя для запуска газотурбинного контура следует производить путем частотного регулирования его напряжения питания во время запуска, что облегчает процесс вхождения ТГ в синхронизм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стабилизация частоты вращения турбогенераторов в системах с газотурбинными контурами при постоянном тепловом потоке и изменяющемся регулируемом эффекте нагрузки /Плеханов С.Н.//Космонавтика и ракетостроение. Вып. 16. 1999.
2. U. Sprengel, W. Westphal. The potential of solar dynamic power systems for future space applications. IAF-86-136. Innsbruck, Austria. 4-11 October. 86.
3. A.A. Pietsch, S.W. Trimble. Closed Brayton solar dynamic power for the Space station IAF-86-135. Innsbruck, Austria. 4-11. October. 86.
4. Синхронные машины автономных источников питания /Паластин Л.М./ М.: Энергия. 1980.
5. Автоматика электроэнергетических систем. /Под ред. Козиса В.Л. и Овчаренко Н.И.// М.: Энергоиздат. 1981.
6. Основы электропривода /Голован А.Т. // М.: ГЭИ. 1959.