

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРТОВОГО ГЕНЕРАТОРА В КАЧЕСТВЕ СТАРТЕРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Введение.** Известна тенденция использования бортовых турбогенераторов, приводимых в движение газотурбинными двигателями (ГТД), в качестве стартеров для этих же двигателей, что облегчает и ускоряет предстартовую подготовку различных летательных объектов. Чтобы выявить такие возможности в каждом конкретном случае, необходим достаточно сложный пересчет параметров генератора на двигательный режим с последующим выявлением необходимых требований к источнику питания стартера и определением параметров и характеристик старта системы ГТД – стартер.

Практика показывает, что такая задача не всегда заканчивается положительным итогом ввиду несовместимости параметров ГТД и стартера из-за весьма ограниченных возможностей последнего по сравнению с требованиями первого. Чтобы избежать сложного комплекса непродуктивных исследований, необходима достаточно простая и вместе с тем эффективная методика оценки совместимости указанных параметров, итогом применения которой и должна явиться постановка задачи на разработку стартерного режима работы генератора. Целью данной работы и является представление такой методики.

**Общий методический подход.** Механический процесс разгона ГТД стартером описывается известным уравнением движения:

$$0,1047 \cdot J_{\text{mec}} \frac{dn}{dt} = M_{\text{mec}} - M_1, \quad (1)$$

где  $J_{\text{mec}}$  – механический момент инерции вращающейся части ГТД вместе с ротором стартера ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ );  $n$  – частота вращения (об/мин);  $t$  – время (с);  $M_{\text{mec}}$  – механический момент вращения на валу стартера (Н·м);  $M_1$  – механический момент нагрузки стартера, который создается ротором ГТД (Н·м).

Дифференциальное уравнение (1) решается достаточно просто и в итоге могут быть получены достигаемая установившаяся частота вращения и время, требующееся для этого. Однако в данном случае основная проблема заключается в отсутствии, как правило, в условиях эксплуатации, полного комплекта необходимых данных, входящих в (1). В нашем случае для числовых иллюстраций ограничимся следующим набором минимальных данных, которыми может располагать исследователь в условиях эксплуатации. А именно: выходная электрическая мощность генератора  $P_G = 4000$  Вт, диапазон частот вращения  $n = 23400 \dots 36000$  об/мин,  $J_{\text{mec}} = 0,102$   $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; необходимая конечная частота вращения в стартерном режиме  $n_q = 16000$  об/мин.

Определим ориентировочно возможное значение  $M_{\text{mec}}$  в стартерном режиме. И начнем с входной механической мощности генератора

$$P_{\text{inG}} = \frac{P_G}{\eta_G} = \frac{4000}{0,7} = 5714 \text{ Вт}. \quad (2)$$

где ориентировочно принят КПД в генераторном режиме  $\eta_G = 0,7$ .

При сохранении мощности в указанном диапазоне частот вращения по формуле:

$$M_{\text{mecG}} = 9,55 \frac{P_{\text{inG}}}{n} \quad (3)$$

определяется диапазон значений отбираемого генератором входного механического момента:  $M_{\text{mecG}} = 1,52 \dots 2,33$  Н·м. Для дальнейшего примем усредненное значение  $M_{\text{mecG}} = 1,9$  Н·м.

Внутренние электромагнитные параметры генератора (магнитный поток возбуждения, токи обмотки статора) соответствуют электромагнитному моменту в генераторном режиме:

$$M_{\text{emG}} = K_{\text{Mem}} M_{\text{mecG}} = 1,7 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4)$$

где используем ориентировочно коэффициент электромагнитного момента  $K_{\text{Mem}} = 0,89$ .

Если сохранить электромагнитные параметры генератора и в стартерном режиме, то сохранится и двигательный электромагнитный момент:

$$M_{\text{emM}} = M_{\text{emG}} = 1,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5)$$

Тогда, при том же коэффициенте  $K_{\text{Mem}} = 0,89$  получается механический выходной момент стартера:

$$M_{\text{mecM}} = K_{\text{Mem}} M_{\text{emM}} = 1,5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (6)$$

Допустим коэффициент перегрузки генератора в стартерном режиме по моменту:  $K_M = 1,33$ . В таком случае механический момент вращения, входящий в (1), составит:

$$M_{\text{mec}} = K_M M_{\text{mecM}} = 2 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (7)$$

Известно, что механический момент нагрузки стартера, создаваемый ГТД, является функцией частоты вращения, т.е.  $M_1(n)$ . Определение этой зависимости, являющейся, по сути, механической характеристикой ГТД в режиме холостого хода, является достаточно сложной задачей. Поэтому для проведения хотя бы тестовых расчетов стартового режима ГТД воспользуемся механической характеристикой ГТД в рабочем режиме, которую можно получить в условиях эксплуатации. Для рассматриваемого ГТД табличную форму механической характеристики удалось достаточно близко аппроксимировать функцией  $M_{1,w} = 0,692 \cdot 10^{-10} n^{2,84}$ .

Очевидно, что при раскрутке неработающего ГТД посредством стартера значения момента сопротивления, оказываемого стартеру со стороны ГТД, должно быть меньше. Это учтем приближенно введением коэффициента  $K_o$  и получим механическую характеристику ГТД в режиме холостого хода:

$$M_1 = 0,692 \cdot 10^{-10} K_o n^{2,84}. \quad (8)$$

Несмотря на все условности, эта зависимость (8) позволяет провести тестовые расчеты механического переходного процесса в стартовом режиме ГТД.

**Расчетные исследования.** Чтобы получить временные зависимости процесса старта ГТД, необходимо решить дифференциальное уравнение (1) при начальных условиях  $t = 0$ ;  $n = 0$ .

Однако сразу, без решения дифференциального уравнения, можно получать достигаемое – установившееся значение частоты вращения  $n_q$ . Для этого в (1) принимаем  $\frac{dn}{dt} = 0$  и на основе  $M_1 = M_{\text{mec}}$  получаем алгебраическое уравнение с учетом (8):

$$0,692 \cdot 10^{-10} K_o n^{2,84} = M_{\text{mec}}. \quad (9)$$

В качестве начального теста возьмем  $K_o = 1$  и представленное в (7) значение  $M_{\text{mec}}$ . Тогда решение уравнения (9) дает только  $n_q = 4824$  об/мин. Если же предположить значение  $K_o = 0,5$ , то получим  $n_q = 6158$  об/мин. Обратный расчет показывает, что для получения требуемого  $n_q = 16000$  об/мин необходимо иметь  $K_o = 0,0332$ , что вряд ли соответствует реальности.

Для численного расчета механического переходного процесса из уравнения (1) выделена производная частоты вращения по времени:

$$n' = \frac{dn}{dt} = \frac{M_{\text{mec}} - M_1}{0,1047J_{\text{mec}}} dt. \quad (10)$$

Численное решение дифференциального уравнения осуществлялось методом Рунге-Кутты IV порядка на временной оси  $t$ , разбитой на интервалы  $\Delta t$ :

$$t_{k+1} = t_k + \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где  $k$  - номер шага.

Экспериментальным путем подобрано достаточное значение временного шага  $\Delta t = 0,1$  с. Определяя на каждом шаге по (10)  $n'_k$ , получаем численный ряд значений частоты вращения:

$$n_{k+1} = n_k + n'_k \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

который, в совокупности с (11), и дает искомую функцию  $n(t) \approx n_k(t_k)$ .

При упоминавшемся ранее значении  $K_o = 0,0332$  зависимость  $n(t)$  представлена на рис. 1. Дополнительно здесь представлена функция  $M_1(t)$ , рассчитываемая по (8).

Из рис. 1 очевидно, что при  $K_o = 0,0332$  установившейся частоты вращения  $n_q = 16000$  об/мин ГТД достигает за  $t = 220$  с. Аналогичные расчеты при  $K_o = 1$  дали  $n_q = 4824$  об/мин за  $t = 70$  с; при  $K_o = 0,5$  за  $t = 90$  с было достигнуто  $n_q = 6158$  об/мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что проведенный анализ показывает, при каких условиях, какой частоты вращения ГТД и за какое время можно достичь с помощью генератора-стартера. Дальнейший анализ уже может быть направлен на то, чтобы определить посредством значительно более детального и трудоемкого поверочного расчета, возможно ли реализовать это посредством использования имеющегося генератора в качестве стартера с точки зрения механических, тепловых и электромагнитных нагрузок, а также какой необходим источник электропитания.

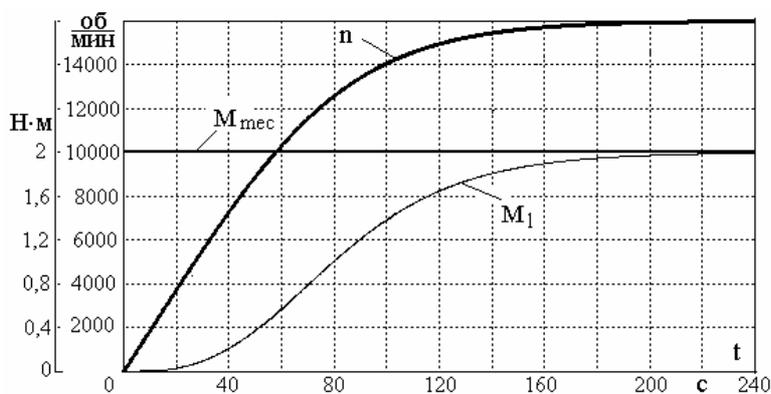


Рис. 1. Процесс старта ГТД