

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ БОРТОВОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАЗГОНА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Представлен принцип достаточно простого и эффективного определения закона регулирования напряжения источника питания стартер-генератора как вентильного двигателя при начальном разгоне газотурбинного двигателя. Приведены расчетные характеристики стартера при разгоне этого двигателя.*

*Подано принцип достатньо простого і ефективного визначення закону регулювання напруги джерела живлення стартер-генератора як вентильного двигуна при початковому розгоні газотурбінного двигуна. Наведено розрахункові характеристики статора при розгоні цього двигуна.*

*The principle is presented there is enough simple and effective determination of control law of feed source voltage of starter-generator as a rectifier motor at the initial acceleration of gas-turbine engine. The calculated characteristics of the engine's stator during acceleration are shown*

**Введение.** В [2] рассматривалась возможность использования бортового турбогенератора, работающего от газотурбинного двигателя (ГТД), в качестве стартера этого же двигателя. Была представлена простая и эффективная методика оценки совместимости общих энергетических параметров и механических характеристик этого двигателя и стартера. В случае положительного результата необходим дальнейший достаточно сложный расчет двигательного режима стартера, основой которого является решение задачи переходного процесса, сопровождающего пуск стартера вместе с ГТД. Для начала таких исследований необходим хотя бы ориентировочный сопутствующий закон регулирования напряжения питания стартера.

**Целью данной работы** является представление методики предварительной подготовки этого закона регулирования напряжения питания стартера.

**Объект исследования.** Электромагнитная система стартера показана на рис.1. Он по сути является

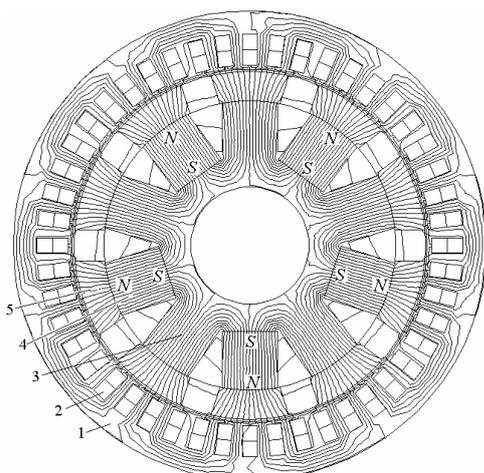


Рис.1. Поперечное сечение стартер-генератора:  
1, 2 – сердечник и трехфазная обмотка статора;  
3 – сердечник ротора с пассивными полюсами;  
4 – постоянные магниты; 5 – ферромагнитные наконечники полюсов

вентильным электродвигателем, питающимся от источника постоянного напряжения  $U_d$ . Схема двигателя с транзисторным инвертором напряжения приведена на рис.2.

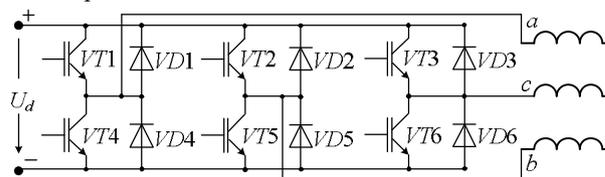


Рис. 2. Схема вентильного двигателя

**Материалы исследования.** В достаточно полной постановке цикл коммутаций (период  $T$ ) инвертора состоит из чередующихся 6 коммутационных и 6 межкоммутационных интервалов, причем во времени вторые занимают основную часть, поэтому на данном этапе пренебрежем первыми. Для примера рассмотрим межкоммутационный интервал времени  $0 \leq t \leq T/6$ , когда открыты транзисторы  $VT1$  и  $VT6$ . Тогда в контуре фазных обмоток  $a$  и  $c$  проходит единый ток  $i_s$  ( $i_c = -i_a$ ) и справедливо уравнение

$$\frac{d\psi_a}{dt} + \frac{d\psi_c}{dt} + 2R_s i_s = U_d, \quad (1)$$

где  $\psi_a, \psi_c, R_s$  – полные магнитные потокосцепления и активное сопротивление фазных обмоток.

Как показали приближенные и полнофакторные расчеты, в межкоммутационном интервале фазные токи можно представить экспонентой

$$i_s = I_{sq} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (2)$$

где установившееся значение тока и постоянная времени  $I_{sq} = \frac{U_d - e_s}{2R_s}$ ,  $\tau = \frac{3L_s}{2R_s}$ ,  $L_s$  – средняя индуктивность фазной обмотки;  $t$  – текущее время от начала рабочего интервала.

Для решения задачи используются определенные на основе классических соотношений [1] для двух фазных обмоток, соединенных последовательно, средние значения ЭДС и электромагнитного момента в пределах текущего рабочего фазного интервала

$$e_s = \frac{\pi}{15} d_r l_s N_s K_{ws} B_\delta n, \quad (3)$$

$$M_{emav} = 2 l_s d_r N_s K_{ws} B_\delta I_{sav}, \quad (4)$$

где  $n$  – частота вращения (об/мин),  $N_s$  – число витков фазной обмотки;  $l_s$  – активная длина обмотки;  $B_\delta$  – среднее значение магнитной индукции в зазоре на ширине наконечников полюсов;  $K_{ws}$  – коэффициент укорочения обмотки;  $d_r$  – диаметр ротора.

Среднее значение тока в пределах рабочего фазного интервала длительностью  $t_w = \frac{60}{m_s p n}$

$$I_{sav} = I_{sq} \left[ 1 + \frac{\tau}{t_w} \left( e^{-t_w/\tau} - 1 \right) \right], \quad (5)$$

где  $p, m_s$  – числа пар полюсов и фаз обмотки статора.

Максимальное значение тока в конце рабочего фазного интервала

$$I_{smax} = I_{sq} \left( 1 - e^{-t_w/\tau} \right). \quad (6)$$

Для разгона ГТД задается необходимая механическая характеристика стартера  $M_M(n)$ . По ней при каждом значении  $n$  определяют текущее значение  $M_{emav} = M_M$ , а из (4) находится необходимое среднее значение тока

$$I_{sav} = \frac{M_{emav}}{2 l_s d_r N_s K_{ws} B_\delta}, \quad (7)$$

а затем из (5) – установившееся значение тока:

$$I_{sq} = \frac{I_{sav}}{1 + \frac{\tau}{t_w} \left( e^{-t_w/\tau} - 1 \right)}. \quad (8)$$

При конкретной частоте вращения  $n$  определяется ЭДС  $e_s$  (3) и по известному значению  $I_{sq}$  – необходимое значение напряжения источника питания

$$U_d = 2R_s I_{sq} + e_s. \quad (9)$$

Таким способом, проведя расчеты в диапазоне изменений  $n$ , получаем первое приближение закона регулирования напряжения источника  $U_d(n)$ .

Расчеты, проведенные для стартер-генератора мощностью 4 кВт, представлены на рис.3 семейством зависимостей рассматриваемых величин от частоты вращения. Здесь, кроме уже называвшихся величин, представлен  $M_l$  – момент сопротивления ГТД.

Ввиду того, что уровень напряжения  $U_d$  ограничен его номинальной величиной  $U_{dN} = 27$  В, при достижении  $n = 8000$  об/мин из-за продолжающегося роста ЭДС  $e_s$  токи и электромагнитный момент уменьшаются и разгон ГТД прекратится при  $n = 12000$  об/мин, так как далее  $M_{emav} < M_l$ .

Вместе с этим важным результатом на рис.3 выявлен и искомый закон регулирования напряжения, который приближенно можно описать линейной зависимостью  $U_d \approx 2,8 + 3 \cdot 10^{-3} n$  (В).

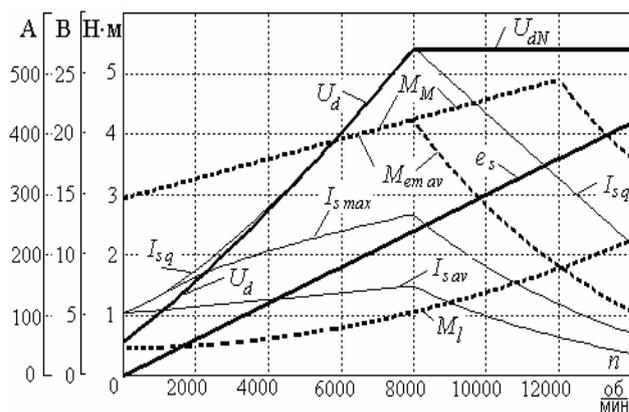


Рис.3. Характеристики стартера при разгоне ГТД

Таким образом, поставленная задача выполняется посредством достаточно простых расчетов с использованием средних значений величин.

#### Список использованной литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек – Л.: Энергия, 1978.– 832 с.
2. Милых В.И. Анализ условий использования бортового генератора в качестве стартера газотурбинного двигателя / В.И.Милых, Т.П.Павленко // Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков: НТУ «ХПИ».–2010.– № 28.– С.466-467.

Получено 29.06.2011



Милых Владимир Иванович,  
д.т.н., зав.каф. эл.машин  
Нац. техн. ун-та «Харьковск.  
политехн. ин-т»,  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков,  
61002,  
тел. (057) 707-65-14;  
e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua



Полякова  
Наталья Владимировна,  
асс. каф. «Общая. эл.техника»  
НТУ «ХПИ»;  
тел. (057) 707-64-27



Юрьева Елена Юрьевна, к.т.н.,  
доц. каф. эл.машин  
НТУ «ХПИ»;  
тел. (057) 707-68-44;  
e-mail: ele6780@yandex.ua