

УДК 621.313

И.Е. КИТАЙЧУК, В.С. МИХЕЕВ, Е.А. МОДИЕВСКИЙ, Б.В. ОСТРОУМОВ*НТ СКБ "ПОЛИСВИТ" филиал ГНПП "Объединение Коммунар", Харьков, Украина***ОСОБЕННОСТИ СТАРТОВОЙ РАСКРУТКИ ГТД
С ПОМОЩЬЮ ВСТРОЕННОЙ ВЕНТИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

Рассматриваются особенности стартовой раскрутки газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием стартерного режима встроенной вентильной электрической машины, предназначенной для работы в режиме турбогенератора. Приведены особенности вентильного турбогенератора ТГ-4. Проанализированы условия раскрутки двигателя. Приведена и обоснована схема стартерного вентильного электропривода. Описан алгоритм управления электроприводом, обеспечивающий ограничение фазных токов. Проанализированы результаты экспериментального исследования. Даны рекомендации по повышению скорости раскрутки двигателя.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, вентильный двигатель, стартер-генератор, турбогенератор, электрозапуск, электропривод.

Введение

Для запуска газотурбинного двигателя (ГТД) необходима его предварительная раскрутка. Такая раскрутка при штатном запуске авиационного ГТД зачастую осуществляется с помощью вспомогательного порохового стартера, а при заводских испытаниях – с помощью внешнего наддува воздуха. Однако, пороховой стартер является устройством однократного применения, а для внешнего наддува необходимо дополнительное дорогостоящее технологическое оборудование, требующее значительных энергозатрат. В то же время на валу многих типов ГТД устанавливается вентильная электрическая машина (ВЭМ), которая после запуска ГТД используется в качестве турбогенератора, питающего бортовую аппаратуру. Для отказа от необходимости применения одноразовых пороховых стартеров и технологического оборудования наддува воздуха, а также для снижения энергозатрат при заводских испытаниях представляется целесообразным осуществлять стартовую раскрутку ГТД с помощью встроенной ВЭМ, используя ее на этом этапе в режиме двигателя. После завершения раскрутки ГТД и последующего переключения указанной ВЭМ в режим генератора она может выполнять штатную функцию питания бортовой аппаратуры. При таком дуальном использовании встроенная ВЭМ преобразуется из генератора в стартер-генератор.

В последнее время ВЭМ находят все большее применение, в том числе в качестве авиационных стартер-генераторов [1]. Общие принципы реализации и описание работы электроприводов с трехфазными ВЭМ достаточно полно приведены в совре-

менной литературе по электроприводам [1, 2, 3]. Однако, используемые в ГТД вентильные турбогенераторы имеют ряд особенностей: управляемое подмагничивание и специфическая конструкция ротора, наличие нескольких взаимно смещенных статорных обмоток. Возможность и особенности использования стартерного режима таких турбогенераторов для раскрутки ГТД требуют дополнительных исследований. Статья посвящена исследованию особенностей раскрутки ГТД с использованием стартерного режима встроенного турбогенератора типа ТГ-4, являющегося ВЭМ с постоянными магнитами на роторе. Обоснованы и описаны структура и принципы построения разработанного стартерного электропривода, обеспечивающего раскрутку ГТД с ограничением фазных токов статорной обмотки. Отражены результаты экспериментального исследования. Приведены рекомендации по снижению времени раскрутки и повышению достигнутой частоты вращения вала ГТД.

1. Особенности турбогенератора ТГ-4

Конструкция ротора приведена на рис. 1.

Ротор турбогенератора ТГ-4 имеет пять пар полюсов. Каждая пара образуется расположенными рядом высокоэнергетическим постоянным магнитом и пассивным ферромагнитным полюсом. Валом ротора является вал ГТД. На статоре расположены две идентичные трехфазные обмотки, пространственно смещенные друг относительно друга на 6°. Фазы А, В и С каждой из этих обмоток последовательно сдвинуты на 120° и соединены по схеме "звезда с изолированной нейтралью". Наличие неподвижной

относительно статора специальной обмотки и ферромагнитных полюсов на роторе обеспечивает управляемое подмагничивание ротора.

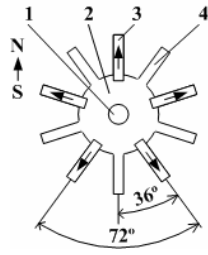


Рис. 1. Конструкция ротора:
1 – вал; 2 – втулка; 3 – постоянный магнит (N-S – его полярность и ось намагниченности); 4 – пассивный ферромагнитный полюс

2. Особенности электропривода

При разработке стартерного электропривода ставилась задача достижения максимально возможной частоты вращения ротора при ограничении фазных токов статорных обмоток ВЭМ ТГ-4. Из теории электропривода [2] следует, что достигаемая за время раскрутки частота вращения вала ГТД (ротора ВЭМ ТГ-4) определяется формулой

$$v(t_p) = \frac{1}{2\pi J} \int_0^{t_p} [M_{ВР}(t) - M_T(t)] dt, \quad (1)$$

где v – частота вращения ротора;
 t_p – длительность раскрутки;
 J – момент инерции вращающейся части ГТД;
 $M_{ВР}$ – вращающий момент;
 M_T – тормозящий момент;
 t – текущее время раскрутки.

Из формулы (1) вытекает, что для раскрутки ГТД требуется, чтобы создаваемый электроприводом вращающий момент был больше тормозящего момента, обусловленного трением в опорах и аэродинамическим сопротивлением, возникающим при вращении ГТД. Учитывая, что аэродинамическое сопротивление ГТД возрастает с увеличением частоты вращения, раскрутка прекращается после достижения равенства вращающего и тормозящего моментов.

При наличии источника постоянного напряжения наиболее простым способом создания вращающего момента в вентильном электродвигателе является поочередная циклическая шеститактная парная коммутация фаз статорной обмотки [3]. При этом для определения моментов отключения от источника питания текущей и подключения следующей пары фаз используется датчик положения ротора (ДПР). В вентильных приводах мощностью до 200 кВт ключи коммутатора питания пар фаз ста-

торной обмотки целесообразно [2] выполнять на транзисторах. Алгоритм управления коммутатором наиболее просто реализуется с помощью микроконтроллера (МК) [1]. С учетом приведенных соображений упрощенная схема электропривода, использующего одну статорную обмотку ВЭМ ТГ-4, имеет вид, приведенный на рис. 2.

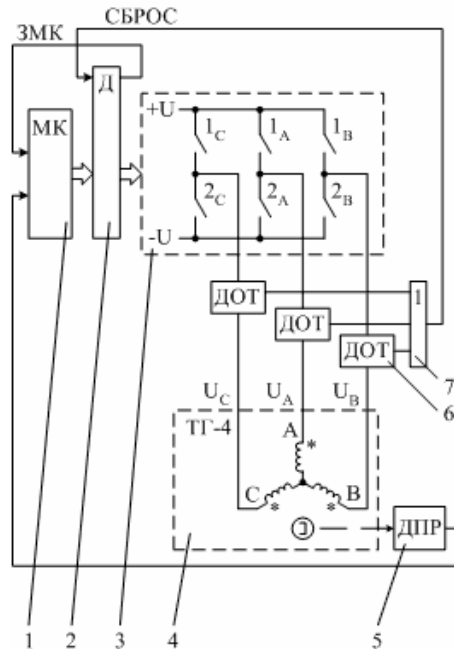


Рис. 2. Схема электропривода:
1 – микроконтроллер; 2 – драйвер; 3 – коммутатор; 4 – вентильная электрическая машина; 5 – датчик положения ротора; 6 – датчик ограничения тока; 7 – схема логического "ИЛИ"

С целью требуемого ограничения фазных токов в схему электропривода введены дополнительные элементы: пороговые датчики ограничения тока (ДОТ) и схема логического "ИЛИ". Благодаря этому увеличение тока любой фазы статорной обмотки выше порогового значения приводит к формированию сигнала СБРОС, поступающего на аппаратный драйвер. При этом драйвер автоматически размыкает все замкнутые ключи коммутатора и выдает на МК сигнал ЗМК. После этого МК программно выдает на драйвер сигналы, обеспечивающие замыкание тех ключей коммутатора, которые должны быть замкнуты в текущем такте управления. Таким образом, когда фазные токи превышают пороговое значение, появляется широтно-импульсная модуляция парной запитки фаз. Это обеспечивает требуемое ограничение фазных токов статорной обмотки. Описанное ограничение фазных токов имеет место в начале раскрутки, когда реактивная электродвижущая сила, наводимая в замкнутых парах фазных обмоток, мала.

Алгоритм циклического шеститактного управления ключами коммутатора приведен в табл. 1. Переход

к очередному такту управления ключами определяется МК в соответствии с информацией от ДПР.

Таблица 1

Алгоритм цикла управления ключами коммутатора

Номер такта в цикле	Состояние ключа						Примечание
	1А	2А	1В	2В	1С	2С	
1	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	При достижении порогового значения тока любой фазы происходит аппаратное размыкание всех ключей, а затем – программное замыкание тех ключей, которые должны быть замкнуты в текущем такте
2	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	
3	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	
4	Разомкнут	Замкнут	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Разомкнут	
5	Разомкнут	Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	Разомкнут	
6	Разомкнут	Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	Замкнут	Разомкнут	

Управление разгоном двигателя обеспечивается в разработанном электроприводе двумя контурами регулирования. Первый контур формирует циклограмму поочередной парной запитки фаз статорной обмотки, обеспечивающую максимальное среднее значение вращающего момента. Реализуемый в этом контуре метод управления вентильным двигателем принято называть [3] управлением с самосинхронизацией по положению ротора, определяемому с помощью ДПР. Второй контур регулирования обеспечивает во время разгона двигателя ограничение фазных токов на уровне максимально допустимого значения.

В соответствии с формулой (1) для увеличения достигаемой в результате раскрутки двигателя частоты вращения его вала необходимо увеличивать вращающий момент. Величина вращающего момента при использовании одной обмотки ВЭМ ТГ-4 определяется [3] формулой

$$M_{ВР} = \frac{3}{2} p_n \cdot \Phi_2 \cdot w \cdot I_1, \tag{2}$$

где $M_{ВР}$ – вращающий момент;

p_n – число пар полюсов на роторе;

Φ_2 – магнитный поток ротора;

w – число витков двух фаз обмотки статора;

I_1 – фазный ток статорной обмотки.

Требуемое ограничение фазного тока статорной обмотки приводит, как следует из формулы (1), к ограничению максимальной величины вращающего момента. В разработанном электроприводе с целью увеличения вращающего момента управление ВЭМ ТГ-4 осуществляется с использованием обеих имеющихся статорных обмоток (на рис. 2 условно не показано). При этом одноименные фазы обеих обмоток управляются синфазно в соответствии с описанным алгоритмом с помощью одного МК и одного ДПР. Остальные элементы электропривода, показанные на рис. 2, являются индивидуальными для обеих обмоток и образуют два идентичных канала управления.

Очевидно, что при шеститактной коммутации фаз и пяти парах полюсов на роторе ДПР должен

фиксировать 30 угловых положений ротора, отстоящих друг от друга на 12°. В каждом из таких положений ротора ДПР должен выдавать в МК сигнал, определяющий необходимость перехода к очередному такту изменения коммутации ключей коммутатора (смотри таблицу 1). Из теории вентильного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе известно [2, 3], что вращающий момент, создаваемый при использовании одной статорной обмотки, определяется формулой

$$M_{ВР} = k\Phi_1\Phi_2 \sin\left(\frac{\theta}{p_n}\right), \tag{3}$$

где $M_{ВР}$ – вращающий момент;

k – конструктивный коэффициент;

Φ_1 – магнитный поток статора;

Φ_2 – магнитный поток ротора;

θ – пространственный угол между векторами потоков статора и ротора;

p_n – число пар полюсов на роторе.

Построенные в соответствии с формулой (3) графики зависимостей вращающего момента от положения ротора при различных состояниях коммутатора приведены на рис. 3. Приведенные на рис. 3 графики иллюстрируют зависимость вращающего момента от положения ротора при непрерывном замыкании соответствующих пар ключей коммутатора (рис. 3, а – рис. 3, е) и при парном переключении ключей коммутатора по информации от ДПР в соответствии с описанным алгоритмом (рис. 3, ж). Вертикальными штриховыми линиями показаны положения ротора, фиксируемые ДПР при его оптимальной установке. Начало координат приведенных графиков соответствует нулевому значению вращающего момента при непрерывном замыкании ключей 1А и 2С коммутатора (рис. 3, а). Как следует из формулы (3) при описанном (таблица 1) алгоритме циклической парной коммутации фаз одной обмотки ВЭМ ТГ-4 вращающий момент имеет пульсирующий характер (рис. 3, ж). При этом разница между максимальным и минимальными значениями вращающего момента $M_{П}$ не превышает 14%. За один полный оборот ротора

ВЭМ ТГ-4 выполняется пять циклов алгоритма управления коммутатором (табл. 1). Каждый цикл алгоритма управления коммутатором обеспечивает поворот ротора на 72° . Угловые положения ротора, в которых вращающие моменты, обусловленные непрерывными замыканиями отдельных пар ключей

коммутатора, равны нулю, условно назовем нейтральными. Очевидно, что для получения максимально возможного среднего значения вращающего момента необходима такая установка ДПР, при которой фиксируемые им положения ротора совпадали с нейтральными положениями ротора (рис. 3).

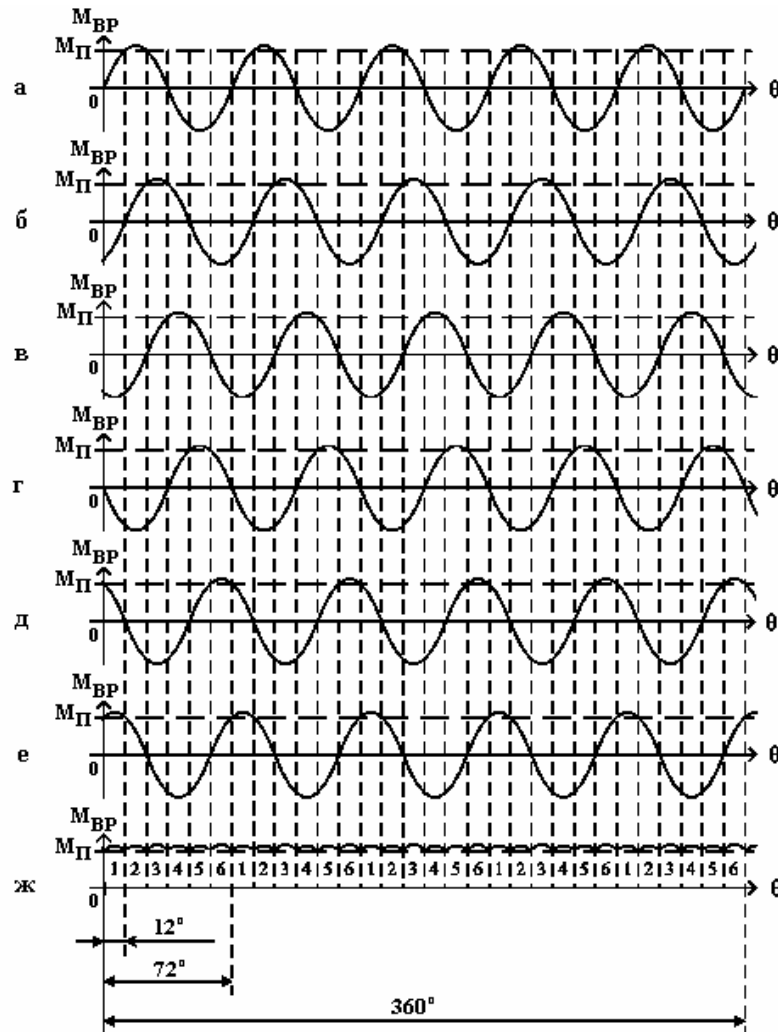


Рис. 3. Графики зависимостей вращающего момента от положения ротора:

- а – при замыкании ключей 1_A и 2_C коммутатора; б – при замыкании ключей 1_B и 2_C коммутатора;
- в – при замыкании ключей 1_B и 2_A коммутатора; г – при замыкании ключей 1_C и 2_A коммутатора;
- д – при замыкании ключей 1_C и 2_B коммутатора; е – при замыкании ключей 1_A и 2_B коммутатора;
- ж – при парном переключении ключей коммутатора по информации от ДПР

3. Результаты исследования

Полученные при экспериментальном исследовании графики раскрутки двигателя с использованием основной, дополнительной и обеих статорных обмоток ВЭМ ТГ-4 приведены на рис. 4. Напряжение U (рис. 2) коммутируемого источника питания при испытаниях было равно 27 В. Фазные токи ограничивались при испытаниях на уровне 100 А. Для обеспечения максимально возможного магнитного

потока ротора при испытаниях задавался максимально допустимый ток обмотки подмагничивания, равный 4 А. Разные результаты раскрутки двигателя при одновременном использовании основной и дополнительной статорных обмоток объясняются тем, что общий ДПР был установлен оптимально для основной обмотки. При этом такая установка ДПР не оптимальна для дополнительной обмотки (из-за взаимного смещения основной и дополнительной статорных обмоток на 6°).

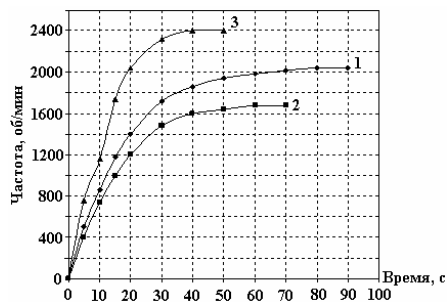


Рис. 4. Графики раскрутки двигателя:
 1 – при коммутации основной обмотки статора;
 2 – при коммутации дополнительной обмотки статора;
 3 – при одновременной коммутации основной и дополнительной обмоток статора

Заключение

Экспериментально подтверждена эффективность разработанного стартерного электропривода.

Литература

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод / В.В. Панкратов // *Электронные компоненты*. – 2007. – № 2. – С. 68-77.
2. Онищенко Г.Б. Электрический привод / Г.Б. Онищенко. – М. : РАСХН, 2003. – 320 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М. : АСАДЕМА, 2006. – 272 с.

Поступила в редакцию 13.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ СТАРТОВОГО РОЗКРУЧУВАННЯ ГТД ЗА ДОПОМОГОЮ ВБУДОВАНОЇ ВЕНТИЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

І.Є. Китайчук, В.С. Михеев, Є.О. Модієвській, Б.В. Остроумов

Розглядаються особливості стартового розкручування газотурбінного двигуна з використанням режиму стартера вбудованої вентильної електричної машини, яка призначена для роботи в режимі турбогенератора. Приведені особливості вентильного турбогенератора ТГ-4. Проаналізовано умови розкручування двигуна. Приведено і обгрунтовано схему стартерного вентильного електроприводу. Описано алгоритм управління електроприводом, що забезпечує обмеження фазних струмів. Проаналізовано результати експериментального дослідження. Даються рекомендації щодо підвищення швидкості розкручування двигуна.

Ключові слова: безконтактний двигун постійного струму, вентильний двигун, стартер-генератор, турбогенератор, електрозапуск, електропривід.

SOME FEATURES OF BRINGING TO ROTATION THE GAS-TURBINE ENGINE BY BUILT-IN VALVE ELECTRIC MACHINE

I.E. Kitaychuk, V.S. Mikheyev, E.A. Modievskiy, B.V. Ostroumov

The article deals with some features of bringing the gas-turbine engine to rotation with the help of the starter mode of the built-in valve electric machine which is intended for work in the turbo-generator mode. Some features of the valve turbo-generator TG-4 are described. The conditions of bringing the engine to rotation are analysed. The circuit of a starter valve electric drive is described and grounded. The electric drive control algorithm, that provides the limitation of phase currents, is described. The results of experimental research are analysed. Recommendations on how to speed-up bringing the engine to rotation are given.

Key words: noncontact direct current engine, valve engine, starter-generator, turbo-generator, electric starting, electric drive.

Китайчук Игорь Евгеньевич – начальник лаборатории НТ СКБ "ПОЛИСВИТ" филиал ГНПП "Объединение Коммунар", Харьков, Украина, e-mail: scb@polisvit.kharkov.ua.

Михеев Владимир Сергеевич – зам. начальника отдела НТ СКБ "ПОЛИСВИТ" филиал ГНПП "Объединение Коммунар", Харьков, Украина, e-mail: scb@polisvit.kharkov.ua.

Модиевский Евгений Александрович – ведущий инженер НТ СКБ "ПОЛИСВИТ" филиал ГНПП "Объединение Коммунар", Харьков, Украина, e-mail: scb@polisvit.kharkov.ua.

Остроумов Борис Владимирович – канд. техн. наук, начальник отдела НТ СКБ "ПОЛИСВИТ" филиал ГНПП "Объединение Коммунар", Харьков, Украина, e-mail: scb@polisvit.kharkov.ua.