

ДАТЧИК АБСОЛЮТНОГО УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Смирнов В.А.¹, Соколов А.В.¹, Мартьянов А.С.¹

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский Государственный университет» (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76), e-mail: dr-sm-v-a@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальные исследования макета генератора газотурбинной установки с целью определения возможности его использования как двигателя для раскрутки турбины при ее запуске. На динамику разгона турбины накладываются определенные требования, связанные, в частности, с необходимостью минимизации явлений резонанса, которые возникают при совпадении скорости вращения ротора турбины и ротора генератора с их собственными частотами. Это может потребовать иметь средства для увеличения скорости вращения генератора в сравнении с принятыми подходами к управлению, использующими сигналы дискретных датчиков Холла. Показано, что скорость вращения ротора макета генератора при его работе как двигателя может быть увеличена за счет изменения угла коммутации его обмоток. С этой целью в конструкции генератора целесообразно отказаться от использования датчиков Холла и использовать абсолютный датчик углового положения, например, RM44, не имеющий механической связи между неподвижными и вращающимися элементами.

Ключевые слова: генератор газотурбинной установки, вентильный двигатель, изменение угла коммутации.

AN ABSOLUTE ENCODER IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Smirnov V.A.¹, Sokolov A.V.¹, Martyanov A.S.¹

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia (454080, Chelyabinsk, Lenin avenue, 76), e-mail: dr-sm-v-a@yandex.ru

An article presents the results of experimental research on the model of generator for turbine engine power station. The purpose of research is to explore an ability to use a generator based on permanent magnet synchronous machine for driving motor during start of turbine. This application requires some specific dynamic properties of driving motor due to the necessity to pass thru the critical vibrations during acceleration. So there is a demand to increase a power capacity in driving motor for fast acceleration that can be provided by optimization of motor control. One of the ways to get more power from driving motor is to change the commutation angle during acceleration in order to compensate a delay of current rising due to the inductance of winding coils. Research results shows the efficiency of the motor can be increased by adjusting of commutation angle, that requires advanced motor control system based on absolute encoder (RM44 for example) and microcontroller instead of Hall sensors.

Keywords: generator of turbine engine power station, permanent magnet synchronous motor, adjustment of commutation angle

Энергетические установки с газотурбинными двигателями все шире используются в качестве автономных систем для комбинированного производства тепла и электроэнергии. Данное оборудование обычно работает на природном газе и вырабатывает электрическую мощность до 200 кВт и более. Выработка электрической энергии осуществляется в генераторе, конструкция которого должна отвечать ряду требований:

- должна обладать высоким КПД;
- должна обеспечивать работоспособность при высокой скорости вращения ротора – до 70...80 тысяч об/мин.

Помимо этого, конструкция должна позволять использовать генератор в двигательном режиме, что обусловлено спецификой работы газотурбинных установок: при ее включении

необходимо раскрутить ротор турбины до скорости, на которой возможен ее запуск. При этом накладываются определенные требования на динамику разгона, связанные, в частности, с необходимостью минимизации явления резонанса, который возникает при совпадении частоты вращения ротора турбины и ротора генератора с их собственными частотами.

При разработке газотурбинной установки, проводимой в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», создан макет генератора и проведены исследования его конструкции.

Цель исследования

Экспериментальные исследования макета генератора проводились с целью определения его параметров при работе в режиме двигателя. Основная задача – определить направления дальнейших работ по увеличению динамики разгона генератора как элемента серийно выпускаемой энергетической установки.

Материалы и результаты экспериментальных исследований

Макет генератора реализован в виде трехфазной двухполюсной синхронной электрической машины [5], включающей в себя (рис. 1): ротор с размещенными на нем постоянными магнитами, выполненными из материала с высокой остаточной магнитной индукции; статор с размещенными в нем статорными обмотками. Закрепление магнитов на роторе осуществлено с помощью бандажа из высокопрочного материала.

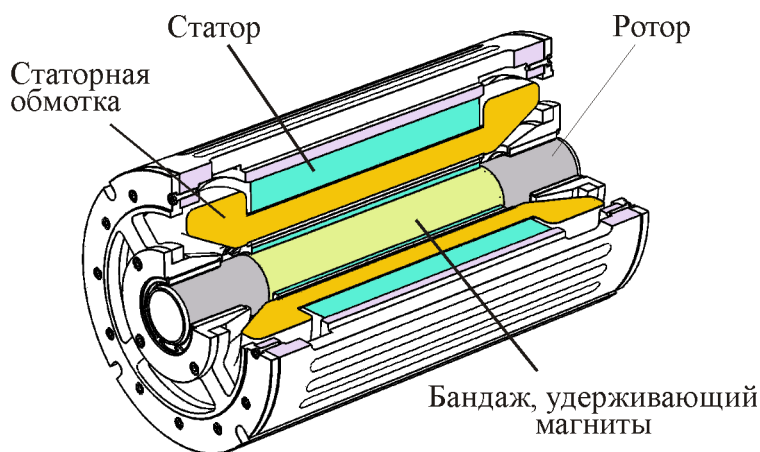


Рис. 1. Конструкция генератора энергетической установки

Такая конструкция генератора позволяет использовать его в качестве электродвигателя, для чего необходимо осуществлять коммутацию статорных обмоток в зависимости от углового положения ротора. В этом случае генератор энергетической установки может рассматриваться как трехфазный двухполюсный синхронный вентильный электродвигатель.

Для управления вентильным двигателем необходимо оснащение его датчиком углового положения ротора. В простейшем случае в качестве такого датчика выступает совокупность из трех (для случая трехфазной электрической машины) магниточувствительных элементов – датчиков Холла, реагирующих на магнитное поле постоянных магнитов, разме-

щенных на роторе. Коммутация обмоток электрической машины осуществляется в зависимости от состояния этих элементов, которое, в свою очередь, определяется угловым положением ротора. В этом случае реализуется трапецеидальная или шестишаговая (sixstep) коммутация вентильного двигателя. Для трех датчиков Холла на полный электрический оборот ротора возможны шесть состояний, каждое из которых соответствует 60 электрическим градусам (рис. 2). При каждом постоянном состоянии датчиков Холла подключаются только две обмотки двигателя, третья отключена от источника напряжения. Несмотря на свойственные этому способу недостатки [6], он широко применяется на практике в случаях невысоких требований к равномерности вращения на низких скоростях.

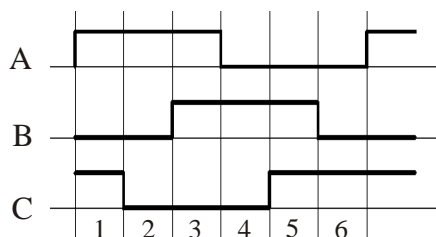


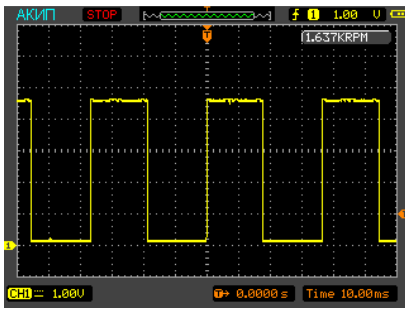
Рис. 2. Идеальная форма сигналов, формируемых датчиками Холла

Последнее характерно для генератора газотурбинной установки, поэтому в макете устройства был реализован именно такой способ получения информации об угловом положении ротора. Однако для принятия решения о применении этого способа в серийном изделии необходимы дальнейшие исследования, связанные со следующими аспектами.

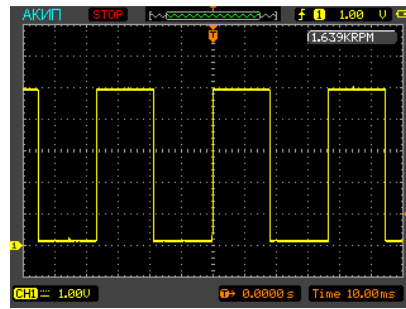
В реальном изделии момент коммутации обмоток электрической машины может отличаться от оптимального как за счет неточного положения датчиков Холла относительно обмоток статора, так и за счет неравномерности магнитного поля, формируемого постоянными магнитами ротора электрической машины. К тому же, за счет индуктивности обмотки ток в ней нарастает с определенной задержкой, которая зависит от частоты коммутации. В связи с этим необходимо оценить влияние конструкционной погрешности [3] на характеристики электрической машины, работающей в двигательном режиме.

При запуске газотурбинной установки важно набрать требуемую скорость вращения ротора с минимальным временем при минимальных энергетических затратах. В качестве «оптимизационного параметра» может выступать временной интервал между моментом переключения датчика Холла и изменением порядка коммутации обмоток [1, 2].

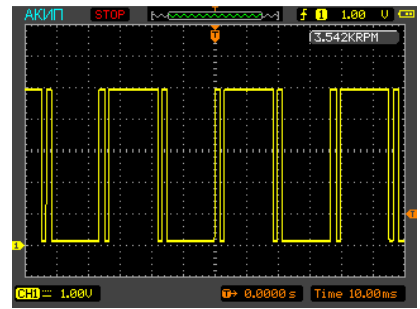
В ходе экспериментов при фиксированном питающем напряжении 24В контролировалась форма сигналов, формируемых датчиками Холла как каждого в отдельности, так и попарно (рис. 3).



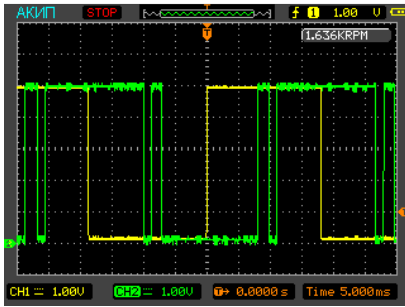
Канал управления А



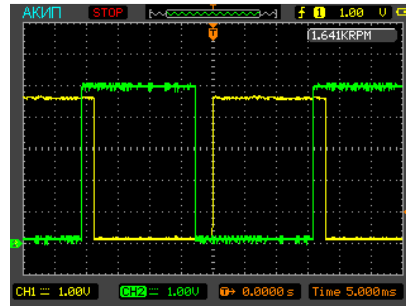
Канал управления В



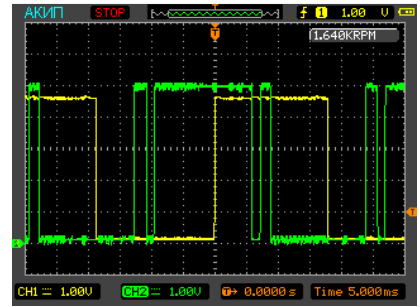
Канал управления С



Каналы управления А и С



Каналы управления А и В



Каналы управления В и С

Рис. 3. Сигналы, формируемые датчиками Холла

Анализ представленных на этом рисунке осциллограмм показал, что:

- форма сигналов по каналам управления А и В практически соответствует требуемой (идеальной);
- форма сигнала по каналу управления С существенно отличается от требуемой (идеальной) – имеют место ложные коммутации;
- взаимное положение фронтов сигналов по каналам управления А, В и С существенно отличается от требуемого.

Для дальнейших исследований было проведено дооснащение макета генератора внешним абсолютным датчиком углового положения RM44 фирмы Renishaw [7]. Особенностью датчика является отсутствие механического контакта между его корпусом и вращающимся элементом (рис. 4). В качестве вращающегося элемента выступает постоянный магнит цилиндрической формы, который был закреплен на торце ротора генератора.

Для осуществления регулирования угла коммутации обмоток электрической машины использовался сигнал от датчика RM44, относительно нуля которого формировались задержки для выработки сигналов управления, имитирующих изменение положения датчиков Холла.

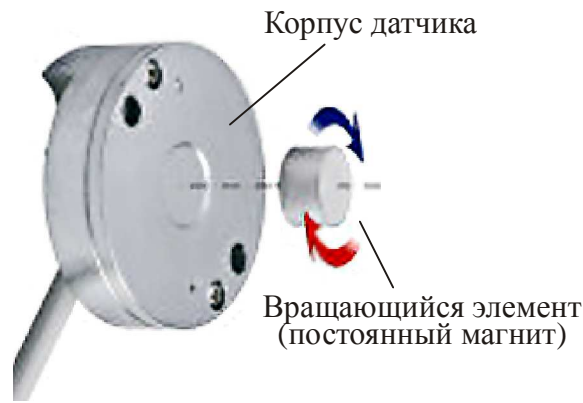


Рис. 4. Абсолютный магнитный датчик углового положения

Формируемая датчиком информация об угловом положении ротора генератора преобразовывалась в сигналы управления по трем каналам А, В и С согласно следующим законам:

Известные уравнения фазных токов i в обмотках вентильного двигателя [4]

$$\frac{3}{2}L \frac{di_A}{dt} + i_A R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_0 \Phi w \Omega \sin \vartheta = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u);$$

$$\frac{3}{2}L \frac{di_B}{dt} + i_B R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_0 \Phi w \Omega \sin(\vartheta + \alpha_B) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u + \alpha_B);$$

$$\frac{3}{2}L \frac{di_C}{dt} + i_C R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_0 \Phi w \Omega \sin(\vartheta + \alpha_C) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u + \alpha_C),$$

где: L – эквивалентная индуктивность фазы, i_A, i_B, i_C – мгновенные значения фазных токов, R – активное сопротивление фазы, p – число пар полюсов, k_0 – обмоточный коэффициент, Φ – полный поток в зазоре на пару полюсов, w – число витков фазы, Ω – частота вращения ротора, ϑ – угол поворота ротора, U_u – напряжение источника постоянного тока, β_0 – угол коммутации, α_B – сдвиг между фазами А и В, α_C – сдвиг между фазами А и С.

При этом параметры β_0, α_B и α_C определяют взаимное расположение (на временной шкале) моментов формирования сигналов по каналам управления и моментов формирования напряжений на соответствующих обмотках. Обычно принимается $\beta_0 = 0$, $\alpha_B = -\frac{2}{3}\pi$, $\alpha_C = \frac{2}{3}\pi$. За счет изменения параметра β_0 характеристики вентильного двигателя можно изменять в очень широких пределах [1].

Таким образом, используя микропроцессорную систему управления коммутацией обмоток электрической машины и имитируя сигналы датчиков Холла в требуемые моменты времени удалось провести эксперименты по изучению влияния изменения угла коммутации.

Результаты экспериментальных исследований

В серии экспериментов контролировалась скорость вращения ротора электрической машины, работающей в двигательном режиме:

- при использовании сигналов управления от датчиков Холла скорость вращения ротора составила 1642 ± 2 об/мин.

- при изменении угла коммутации в пределах $\pm 10^\circ$ максимальная скорость 1670 ± 2 об/мин была получена для $\beta_0 = 6^\circ$.

Выводы:

1. Созданный в ходе работ по разработке газотурбинной установки макет генератора может работать в качестве двигателя, обеспечивая раскрутку ротора газотурбинного двигателя до требуемой скорости вращения.
2. Сигналы, формируемые датчиками Холла в электрической машине, могут существенно отличаться от требуемых в соответствии с принятыми подходами к управлению. Причины этого требуют дополнительных исследований.
3. Использование абсолютного датчика углового положения позволяет формировать управляющие сигналы, близкие по параметрам к требуемым. Для реализации этого целесообразно применение в конструкции генератора датчика абсолютного углового положения, например, RM44. Отсутствие в нем механического контакта между неподвижными и вращающимися частями позволит упростить его интеграцию в конструкцию генератора.
4. За счет изменения угла коммутации может быть достигнута большая эффективность электрической машины во всем диапазоне скоростей вращения ротора, при этом обеспечивается скорость вращения ротора большая, чем при использовании датчиков Холла.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013г.

Список литературы

1. Воронин С. Г. Динамические модели вентильного двигателя при различных сочетаниях параметров/ С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, Р.Т. Киякпаев, А.С. Кульмухаметова. //Известия Академии электротехнических наук РФ. Издание Академии электротехнических наук РФ. – М.: «Янус-К». – 2011. – №12. – С. 47-52.
2. Воронин С. Г. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентильных двигателей по энергетическим показателям и регулировочным свойствам / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – №1. – С. 96-102.

3. Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Методика ускоренного расчета синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". – 2014. – № 5 (145). – С. 42–44.
4. Горшков Р.Г. Разработка и исследование вентильного двигателя с постоянными магнитами на основе математического моделирования магнитного поля: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Самара, 2011. – 22 с.
5. Киндряшов А.Н., Мартьянов А.С., Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», – 2013. – № 1-2 (118). – С. 59-62.
6. Сонных М. Основные технические особенности вентильных двигателей / М. Сонных, Л. Ганнель // РИТМ. – 2010. – №11. – С. 10-13.
7. Datasheet: RM44 magnetic encoder base unit. URL: [http://resources.renishaw.com/details/Data+sheet%3A+RM44+magnetic+encoder+base+unit\(158718\)\(49645\)](http://resources.renishaw.com/details/Data+sheet%3A+RM44+magnetic+encoder+base+unit(158718)(49645)) (дата обращения: 05.09.14).

Рецензенты:

Ганджа С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск;

Кирпичникова И.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск.