

УДК 621.314

Устойчивость синхронного электропривода антенны радиолокационных станций с цифровой системой управления

В.Н. Марденский¹, И.В. Бобылев¹, М.В. Андриухин¹, В.Ф. Стрелков¹, В.Г. Титов², Е.А. Чернов²

¹ ОАО Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующие методы настройки не позволяют одновременно определять коэффициенты цифровых пропорционально-интегральных регуляторов нескольких контуров в системе управления с подчиненным регулированием. Также недостаточно полно изучен вопрос влияния коррекции угла с датчика положения ротора на диапазон питающего напряжения электропривода.

Материалы и методы: Непрерывная математическая модель электропривода создана в программном пакете Matlab Simulink. Экспериментальные исследования электропривода и электродвигателя проведены при изменении питающего напряжения и коррекции угла с датчика положения ротора.

Результаты: Разработана непрерывная модель, предназначенная для оптимальной настройки цифровой системы управления электропривода радиолокационных станций. Рассчитаны фазные токи электродвигателя. Получены экспериментальные зависимости этих токов и коэффициентов мощности электропривода и электродвигателя. Установлено, что для настройки приведенной цифровой системы управления отсутствует необходимость учитывать дискретность инвертора.

Выводы: Для реализации электропривода вращения радиолокационных станций с расширенным диапазоном питающего напряжения необходимо вводить программную коррекцию угла с датчика положения ротора. Используя результаты моделирования можно получить устойчивую работу электропривода вращения радиолокационных станций. Полученные экспериментальные зависимости показывают, что при введении коррекции угла с датчика положения ротора в систему управления и при изменении питающего напряжения в требуемом диапазоне коэффициент мощности электродвигателя и электропривода имеет высокий уровень.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, цифровая система управления, радиолокационная станция, синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическая модель.

Stability of Synchronous Electric Drives of Antenna of Radar Stations with Digital Control System

V.N. Mardensky¹, I.V. Bobylev¹, M.V. Andryukhin¹, V.F. Strelkov¹, V.G. Titov², E.A. Chernov²

¹ Joint Stock Company Federal Research and Industrial Centre «Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

Abstract

Background: The existing setting methods do not allow to find the coefficients of digital proportional-integral (PI) controllers of multiple loops in the control system with dependent control. Moreover, the effect of angular correction input from the rotor position sensor on the supply voltage range of the electric drive has not been investigated in detail.

Materials and methods: A continuous mathematical model of the electric drive has been developed in Matlab Simulink software package. Experiments have been conducted on the electric drive and electric engine with supply voltage variation and angular correction input from the rotor position sensor.

Results: The continuous model has been developed for optimal setting of a digital electric drive control system in radar stations. Electric engine phase currents have been calculated. Experimental dependencies of these currents and power ratios for the electric drive and electric engine have been obtained. It has been established that tuning the given digital control system does not require taking into account the inverter resolution.

Conclusions: To implement a radar electric rotation drive with an extended range of supply voltages, it is necessary to introduce a programmable angle correction from the rotor position sensor. Using the simulation results we can achieve steady operation of the electric rotation drive in a radar. It can be seen from the experimental dependencies that with the input of angular correction from the rotor position sensor into the control system and with the supply voltage varying within a required range, the power ratio of the electric engine and electric drive remains at a high level.

Key words: adjustable electric drive, digital control system, radar station, permanent magnet synchronous motor, mathematic model.

В современных многодиапазонных радиолокационных комплексах (РЛК) с активной фазированной антенной решеткой (АФАР) электропривод обеспечивает синхронное вращение радиолокационных станций (РЛС), слежение и установку на заданный азимут. При этом электропривод должен быть стойким, прочным и устойчивым к внешним воздействующим факторам (механическим, климатическим, биологическим и специальным средам). В частности, электропривод должен обеспечивать работоспособность в жестких климатических условиях, а также под воздействием электромагнитного излучения различных диапазонов волн. Вместе с тем он должен обеспечивать работу во всех режимах с входным напряжением, изменяющимся в диапазоне от 330 до 440 В относительно номинального значения 380 В.

В научно-исследовательском институте радиотехники (ННИИРТ) проведена работа по созданию электроприводов радиолокационных модулей, реализованных на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), управление которым осуществляется транзисторным инвертором на основе сигналов датчика положения ротора. Синхронные двигатели с постоянными магнитами типа 6ДВМ со встроенным резольвером производства ЗАО «ЧЭАЗ» предназначены для использования в образцах военной техники [1]. В модуле дециметрового диапазона волн применен 6ДВМ215S, а в модуле метрового диапазона – 6ДВМ300А, соответственно мощностью 5,5 и 15 кВт.

В системе управления электроприводами использован цифровой сигнальный процессор (ЦСП) TMS320F2810, в котором реализован классический алгоритм векторного управления двигателем переменного тока. В настоящее время проводится работа по переводу алгоритма управления на отечественный микроконтроллер 1986BE91T с ядром ARM Cortex-M3. Система управления верхнего уровня реализована в специальных ЭВМ радиолокационных модулей и включает в себя контур положения на основе азимутального датчика, который находится на валу антенны. Контур положения формирует сигналы задания скорости.

Система управления построена в синхронно-вращающейся системе координат (d, q) по принципу систем управления с подчиненным регулированием, причем внутренним контуром является контур тока по оси q , а внешним – контур скорости. Для минимизации тока статора при заданной величине момента нагрузки ток по оси d задан нулевым. Для проверки устойчивости работы электропривода и для корректной настройки регуляторов произведено математическое моделирование данного электропривода.

Построена математическая модель СДПМ с поверхностными магнитами на роторе [1, 2],

т. е. индуктивность по продольной оси, направленной по магнитной оси ротора L_d , такая же, как индуктивность по поперечной оси L_q : $L_d = L_q = L$. При построении математической модели приняты следующие допущения:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Экспериментально установлено, что инвертор является почти безинерционным звеном, поэтому для настройки регуляторов нет необходимости учитывать дискретность инвертора.

Для систем с подчиненным регулированием характерна сложность поочередной настройки внутреннего и внешнего контуров из-за трудоемкости этого процесса. В связи с этим настройку всех контуров проводили в программном пакете Matlab Simulink, который позволяет настроить контуры с учетом их взаимного влияния.

Настройка регуляторов проводилась с учетом рациональных требований к контурам:

- коэффициент демпфирования не более 0,707;
- перерегулирование не более 20 %;
- время переходного процесса не более 0,5 с.

Воспользовавшись уравнениями СДПМ в синхронной вращающейся системе координат (d, q) , с учетом нормирования значений тока относительно номинального значения датчика тока была построена математическая модель электропривода в программном пакете Matlab Simulink. Нормирование значений тока относительно номинального значения датчика тока удобно для сопряжения с микроконтроллером.

Математическая модель позволила произвести настройку системы управления с помощью tools – compensator design, а в частности, определить коэффициенты ПИ-регуляторов в контурах токов по осям d и q и в контуре скорости. Так же, с помощью моделирования, данная система была проверена на устойчивость. Практическая реализация полученных результатов позволила обеспечить устойчивую работу электропривода радиолокационного модуля.

На рис. 1, 2 приведены результаты моделирования фазного тока электродвигателя с помощью непрерывной и дискретной моделей. На рис. 3 приведена осциллограмма фазного тока электродвигателя, полученная экспериментальным путем (скорость вращения 2900 об/мин, момент на валу 50 Нм).

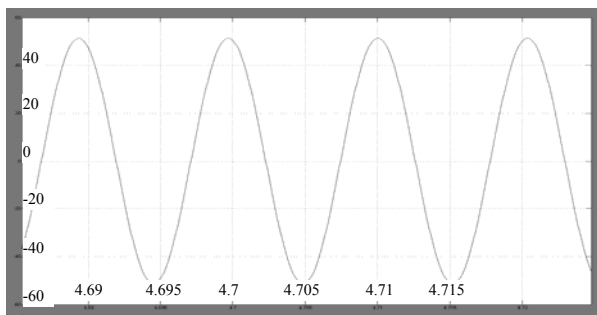


Рис. 1. Осциллограмма фазного тока электродвигателя, полученная с помощью непрерывной модели

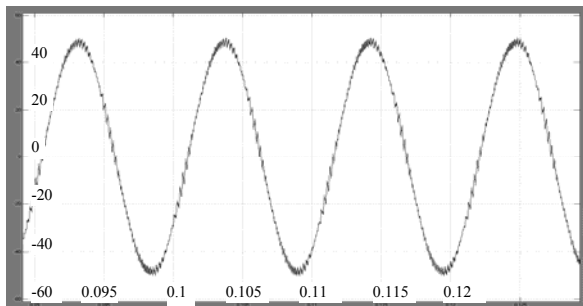


Рис. 2. Осциллограмма фазного тока электродвигателя, полученная с помощью дискретной модели

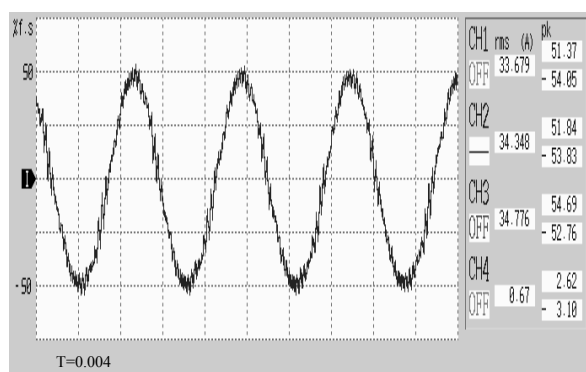


Рис. 3. Осциллограмма фазного тока электродвигателя, полученная экспериментальным путем

Сравнительный анализ графиков (рис. 1–3) и результатов моделирования и эксперимента (см. таблицу) показывает, что результаты исследования с помощью моделирования совпадают с экспериментальными исследованиями, при этом моделирование дискретной системы для данного случая показывает, что дискретность не вносит существенных изменений в форму фазного тока двигателя. Это дает возможность проверять систему управления на устойчивость на более простой непрерывной модели.

Сравнительные характеристики моделирования и эксперимента

| Параметры | Непрерывная модель | Дискретная модель | Экспериментальные данные |
|-------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| I_m^* , А | 50,18 | 50,5 | 51,37 |
| f , Гц | 96,4 | 96,5 | 96,7 |

* I_m – амплитуда фазного тока электродвигателя

В ходе дальнейших исследований было установлено, что в режиме равномерного вращения антенны (со скоростью 6 об/мин, что соответствует 2900 об/мин на валу двигателя) и при максимальном нагрузочном моменте минимальное значение напряжения питающей сети, при котором обеспечивается бесперебойная работа электропривода, составляет 362 В.

При меньших значениях напряжения сети происходит срабатывание максимально токовой защиты, что вызвано превышением ЭДС вращения СДПМ величины выходного напряжения инвертора.

Для расширения рабочего диапазона входных напряжений в алгоритм управления была введена программная коррекция угла с датчика положения ротора, что привело к ослаблению магнитного поля СДПМ и, как следствие, к возможности работы привода при низких напряжениях питания. Экспериментальные зависимости коэффициента мощности для электродвигателя и электропривода приведены на рис. 4, 5.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4, 5) показывает, что смещение угла датчика положения ротора на 16° дает возможность работы при входном напряжении 320 В при незначительном изменении коэффициента мощности электропривода.

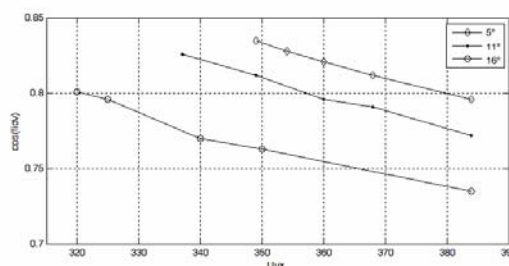


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности электродвигателя от входного напряжения

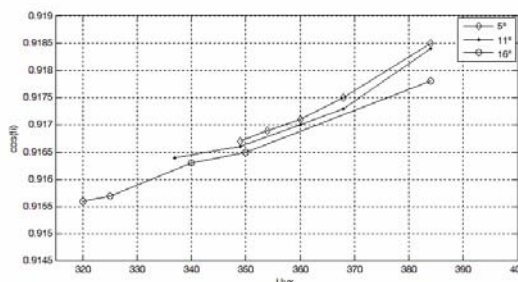


Рис. 5. Зависимость коэффициента мощности электропривода от входного напряжения

Установлено, что для настройки приведенной цифровой системы управления нет необходимости учитывать дискретность инвертора. Для реализации электропривода вращения РЛС с расширенным диапазоном питающего напряжения необходимо вводить программную коррекцию угла с датчика положения ротора. Используя результаты моделирования можно получить устойчивую работу электропривода вращения РЛС. Анализ экспериментальных

зависимостей показал, что при введении коррекции угла с датчика положения ротора в систему управления и при изменении питающего напряжения в требуемом диапазоне коэффициент мощности электродвигателя и электропривода имеет высокий уровень.

Список литературы

1. **Перельмутер В.М.** Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
2. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008. – 298 с.
3. **Афанасьев А.А., Нестерин В.А., Никитин В.М., Романов Р.А.** Магнитоэлектрические вентильные двига-

тели производства ЗАО «ЧЭАЗ» // Вестник Чувашского университета. Т. 3. Естественные и технические науки. – 2010. – С. 187–192.

References

1. **Perel'muter, V.M.** *Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigateley peremennogo toka* [Direct Control of Torque and Current in AC Motors]. Khar'kov, Osнова, 2004. 210 p.
2. **Vinogradov, A.B.** *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Control of AC Electric Drives]. Ivanovo, 2008. 298 p.
3. **Afanas'ev, A.A., Nesterin, V.A., Nikitin, V.M., Romanov, R.A.** *Magnitoelektricheskie ventil'nye dvigateli proizvodstva ZAO «ChEAZ»* [Permanent-magnet AC Electronic Motors from JSC ChEAZ]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2010, vol. 3, pp. 187–192.

Марденский Владимир Николаевич,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
начальник отдела,
телефон (831) 4-695-907,
e-mail: STO@nniirt.ru

Бобылев Игорь Владимирович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
начальник сектора,
телефон (831) 4-695-907,
e-mail: STO@nniirt.ru

Андрюхин Максим Владимирович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
инженер,
телефон (831) 4-695-907,
e-mail: STO@nniirt.ru

Стрелков Владимир Федорович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
телефон (831) 4-650-216,
e-mail: STO@nniirt.ru

Титов Владимир Георгиевич,
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электрооборудования судов,
телефон (831) 4-360-369,
e-mail: epa@nntu.nnov.ru

Чернов Евгений Александрович,
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева,
доктор технических наук, профессор,
телефон (831) 4-360-369,
e-mail: epa@nntu.nnov.ru