Ле Суан Хонг
Le Xuan Hong

*кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Электрический транспорт»,
Хошиминский университет транспорта,
Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам*

УДК 629.423.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-15-25

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В СРЕДЕ MATLAB

Актуальность

Практически с первых этапов электрификации железных дорог непрерывно ведется создание электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронными тяговыми машинами (АТМ). В настоящее время во всем мире широко внедряется ЭПС с бесколлекторными тяговыми машинами, преимущественно АТМ, так как они обладают многими преимуществами. Однако практика и опыт эксплуатации показывают, что тяговый электропривод (ТЭП) с асинхронным двигателем (АД), устанавливаемый на ЭПС метрополитена, имеет ряд недостатков, к которым, в первую очередь, относится принципиальная невозможность обеспечения двух важнейших требований к ТЭП — широкий диапазон регулирования частоты вращения при равенстве моментов двигателей, работающих на общую нагрузку из-за отсутствия применения современного способа управления, называемого «векторным». В результате установленная мощность применяемых АД завышена, а электрическое торможение вагона вплоть до его полной остановки невозможно. Поэтому решение этих проблем представляется актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Цель исследования

Основной целью работы является создание схемы (как силовой схемы, так и схемы управления) вагона метрополитена с асинхронным электроприводом (АЭП), лишённой указанных выше недостатков. В частности, при разработке схемы управления акцент сделан на алгоритмы и принципы векторного управления АЭП.

Методы исследования

Для решения вышеизложенных задач были использованы методы построения силовых систем и систем автоматики, а также пакеты программ для математического моделирования.

Результаты

Предложен алгоритм для реализации векторного управления. Разработана блок-схема системы управления, которая смоделирована в среде Simulink пакета Matlab. Получены результирующие графики, демонстрирующие работу модели и принцип векторного управления.

Ключевые слова: релейно-контакторная система, коллекторные тяговые двигатели, тяговый частотно-регулируемый электропривод, асинхронный электродвигатель, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), диапазон регулирования частоты вращения, векторное управление АЭП, кривая основного сопротивления движению, канал управления

DEVELOPMENT OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR MODEL OF METRO TRAIN WITH VECTOR CONTROL IN THE MATLAB

Relevance

Almost from the first stages of electrification of railways, the creation of electric rolling stock (ERS) with asynchronous traction machines (ATM) has been continuously carried out. At present, ERS with brushless traction machines, mainly ATM, is widely introduced all over the world, since they have many advantages. However, practice and operating experience show that a traction electric drive (TED) with an asynchronous motor (AM), installed on the ERS of the metro, has a number of disadvantages, which primarily include the fundamental impossibility of meeting the two most important requirements for TED — a wide range of speed control with equal torques of motors operating on a common load due to the lack of the use of a modern method of control, called «vector». As a result, the installed power of the applied AM is overestimated, and electric braking of the car up to its complete stop is impossible. Therefore, the solution of these problems seems to be an urgent task of practical importance.

Aim of research

The main aim of the research is to create a circuit (both a power circuit and a control circuit) with an asynchronous electric drive (AED), devoid of the above disadvantages. In particular, when developing a control scheme, the emphasis is on the algorithms and principles of vector control of the AED.

Research methods

To solve the above problems, methods of constructing power systems and automation systems were used, as well as software packages for mathematical modeling.

Results

An algorithm for the implementation of vector control is proposed. The block diagram of the control system is developed, which is modeled in the Simulink environment of the Matlab package. Resulting graphs demonstrating the operation of the model and the principle of vector control.

Keywords: relay-contactor system, collector traction motors, traction frequency-controlled electric drive, asynchronous electric motor, pulse width modulation (PWM), speed control range, vector control of asynchronous electric drive, main resistance curve, control channel

Введение

В настоящее время существующий на электроподвижных составах (ЭПС) привод постоянного тока с релейно-контактной системой (РКС) управления прост, но неэкономичен по расходу электроэнергии и текущим расходам на содержание. Этот привод по многим параметрам уже перестал удовлетворять современным требованиям. РКС управления требует частого обслуживания и ремонта, связанного с малыми ресурсными возможностями контактных систем, и требует значительных в общем объеме материальных затрат. Кроме того, как показывает опыт

эксплуатации, неквалифицированное обслуживание и ремонт приводят к отказам оборудования на линии, что ведет к сбоям графика движения и, в конечном результате, к материальным убыткам. Анализируя причины отказов, можно сказать, что в большинстве случаев они связаны с нарушением технологии обслуживания и ремонта оборудования привода. Экономичность привода постоянного тока невысока из-за больших потерь энергии на пусковых и тормозных реостатах в режимах разгона и торможения. Коллекторные тяговые двигатели боятся перегрузок и требуют повышенного вни-

мания к обслуживанию щеточно-коллекторных узлов в эксплуатации и сложной высокозатратной технологии ремонта [1]. Однако тяговый частотно-регулируемый электропривод с асинхронным двигателем (АД), устанавливаемый на электроподвижном составе (ЭПС) метрополитена, имеет ряд недостатков:

1) комплект электрооборудования современных поездов представляет собой асинхронный электропривод (АЭП) с автономным инвертором напряжения на IGBT-модулях, питающий одновременно 4 тяговых двигателя. Диапазон регулирования при такой силовой схеме получается ограниченным, а из-за разброса характеристик тяговых машин и различия в диаметрах бандажей возникает неравномерность в распределении нагрузок между осями вагона.

Помимо этого, такая система имеет ограниченную надёжность из-за того, что при выходе из строя инвертора напряжения сразу выходит из строя вся силовая схема вагона, что является значительным недостатком в условиях современной загруженности линий метрополитена в часы пик.

Параллельное включение обмоток статоров 4-х асинхронных двигателей вагона с их питанием от общего преобразователя частоты, низкое отношение частоты ШИМ к частоте основной гармоники напряжения питания двигателя не позволяют применить современный способ управления, называемый «векторным». Из этого следует принципиальная невозможность обеспечения двух важнейших требований к тяговому электроприводу (ТЭП) — широкий диапазон регулирования частоты вращения при равенстве моментов двигателей, работающих на общую нагрузку [2–4]. В результате установленная мощность применяемых АД завышена, а электрическое торможение вагона вплоть до его полной остановки невозможно;

2) ЭПС метрополитена имеет неравномерный график потребления электрической энергии по времени. Потребление энергии особенно значительно в период разгона, менее значительно в периоды их равномерного движения и отсутствует на выбеге, т.е. в периоды движения по инерции. Значительное количество кинетической энергии движущихся поездов в момент начала торможения превращается в электрическую энергию, которая в процессе торможения выделяется в виде тепла в тормозных реостатах (около 35 %) и, как следствие, приводит к дополнительному нагреву тоннелей, тяговых подстанций и станций метро [5, 6].

Вследствие сказанного тяговые подстанции (ТП) метрополитена непрерывно испытывают значительные колебания нагрузки, вызываемые суммированием нагрузок фидеров. При пиковых нагрузках, возникающих при наложении пусковых токов по фидерам друг на друга, снижается напряжение на шинах ТП и в тяговой сети на промежуточных станциях метро, расположенных между двумя соседними ТП. Это замедляет процессы пусков поездов и приводит к дополнительным потерям электрической энергии в тяговой сети. Эффективность рекуперативного торможения, которое применяется на некоторых линиях железных дорог, когда энергия передаётся непосредственно в контактную сеть, в реальных условиях не превышает 8–10 % [6]. Это связано с тем, что энергия, рекуперированная в контактную сеть, своевременно не потребляется другими разгоняющимися электропоездами.

Для решения этих проблем предпринимаются усилия по созданию компактных, эффективных устройств для оперативного аккумулирования и последующего возврата электрической энергии.

Основной целью является создание схемы (как силовой схемы, так и схемы управления) вагона метрополитена с

АЭП, лишённой указанных выше недостатков. В частности, при разработке схемы управления акцент сделан на алгоритмах и принципах векторного управления АЭП.

Блок-схема завершенной системы управления

Моделирование осуществляется на основе блок-схемы (рисунок 1) системы векторного управления асинхронным двигателем ДАТЭ-170-4У2 электроподвижного состава метрополитена.

Алгоритм формирования значений регистров сравнения осуществляет блок под названием «векторное ШИМ» данной блок-схемы. Система векторного управления имеет два контура обратной связи: контур скорости (нижняя часть рисунка) и контур тока (чуть выше контура скорости).

Для упрощения алгоритма расчёта параметров формирования управляющих векторов в схеме присутствует блок преобразования координат и числа фаз. Неотъемлемыми частями схемы управления являются регуляторы скорости и тока. Данные элементы реализуются исключительно программно микропроцессором [7–10]. Кроме того, следует

отметить в данной схеме блок оценки положения, осуществляющий определение сектора работы инвертора. Параметры двигателя ДАТЭ-170-4У2 [11], на основе которых будет производиться моделирование, сведены в таблицу 1.

Построение модели АД с векторным управлением в среде Matlab

Модель асинхронного привода с векторным управлением, построенная в среде моделирования Matlab, представлена на рисунке 2.

Данная модель имеет 2 канала: силовой канал и канал управления. Силовой канал состоит из источника постоянного напряжения (750 В), силового IGBT инвертора и АД мощностью 170 кВт. Силовой канал представлен в верхней части рисунка 2. В нижней части рисунка представлен канал управления.

Электрические характеристики двигателя задаются в параметрах блока АД в соответствии с таблицей 1 и представлены на рисунке 3.

В качестве нагрузки на валу двигателя задаётся кривая момента сопротивления движению в зависимости от радиальной скорости вала двигателя (рисунок 4). Задание производится блоком «f(u)».

Рисунок 1. Блок-схема завершенной системы управления

Figure 1. Block-diagram of the complete control system

Таблица 1. Параметры двигателя ДАТЭ-170-4У2

Table 1. Engine parameters DATE-170-4U2

№	Параметр	Значение
1	Номинальная мощность, кВт	170
2	Номинальный КПД, о.е.	0,95
3	Номинальный $\cos\varphi$	0,85
4	Номинальное напряжение U_n , В	750
5	Номинальная частота вращения (синхр.), об/мин	1500
6	Максимальная частота вращения (синхр.), об/мин	1500
7	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	0,0141
8	Реактивное сопротивление обмотки статора, Ом	0,0951
9	Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	0,00903
10	Реактивное сопротивление обмотки ротора, Ом	0,000363
11	Взаимная индуктивность, Гн	0,011678
12	Момент инерции ротора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	2,13

Рисунок 2. Модель асинхронного двигателя с векторным управлением

Figure 2. Induction motor modeling for vector control

Block Parameters: Asynhron Motor 170kV

[Asynchronous Machine \(mask\) \(link\)](#)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.

Parameters

Preset model: No

Mechanical input: Torque Tm

☒ Show detailed parameters

Rotor type: Squirrel-cage

Reference frame: Stationary

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:
[170000 550 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:
[0.0141 0.000303]

Rotor resistance and inductance [Rr(ohm) Llr(H)]:
[0.00903 0.000363]

Mutual inductance Lm (H):
0.011678

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]:
[2.13 0.05658 2]

Initial conditions
[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

☐ Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3. Параметры блока асинхронного двигателя

Figure 3. Block parameters of induction motor

Рисунок 4. Кривая основного сопротивления движению

Figure 4. The curve of the main resistance to movement

Кривые напряжения U_{ab} , токов статора, скорости вала двигателя и электромагнитного момента отображаются в блоке «score».

Алгоритмы и принципы векторного управления асинхронным электроприводом

Канал управления реализует алгоритм векторного управления, подавая сигналы на открытие и закрытие силовых ключей в блок IGBT инвертора [11]. Задание динамики разгона ТЭП осуществляется с помощью блока «Speed control», где задание производится с помощью кривой, таким образом, можно реализовывать различные значения динамики разгона. Значение от датчика скорости сравнивается с сигналом обратной связи по скорости в блоке суммирования. Вычисленная ошибка по скорости пода-

ётся на ПИ-регулятор. Сумматор и ПИ-регулятор реализованы в одном блоке «Speed controller».

Далее сигнал подаётся на блок вычисления тока I_q статора. Ток I_d вычисляется в отдельном блоке. Далее сигналы I_q и I_d подаются на блок преобразования координат «dq to ABC conversion».

Для преобразования координат требуется вычисление угла тета, которое производится в блоке «Teta calculation». Формирование сигналов управления силовыми ключами выполняет блок «Current regulator».

Содержание и структура вышеописанных блоков представлены на рисунках 5–8.

Результирующие графики, демонстрирующие работу модели и принцип векторного управления, показаны на рисунках 9–12.

Рисунок 5. Блок вычисления тока I_q

Figure 5. I_q current calculator

Рисунок 6. Блок преобразования координат «dq to ABC»

Figure 6. Coordinate transformation block «dq to ABC»

Рисунок 7. Блок преобразования координат «ABC to dq»

Figure 7. Coordinate transformation block «ABC to dq»

Рисунок 8. Блок вычисления угла тета

Figure 8. Theta angle calculator

Рисунок 9. Кривые напряжения на выходе инвертора

Figure 9. Inverter output voltage curves

Рисунок 10. Кривая радиальной скорости вала двигателя

Figure 10. Radial speed curve of the motor shaft

Рисунок 11. Кривая электромагнитного момента

Figure 11. Electromagnetic moment curve

Рисунок 12. Кривые тока статора

Figure 12. Stator current curves

Выводы

Рассмотрена блок-схема завершенной системы векторного управления асинхронным двигателем ДАТЭ-170-4У2.

Разработана модель АД электроподвижного состава метрополитена в среде

Matlab. Адекватность работы модели, демонстрирующей принцип векторного управления, можно оценить с помощью графиков, полученных в ходе моделирования.

Список источников

1. Ракитин А. Будущее — за асинхронным приводом. Технический отдел службы подвижного состава. Петербургский метрополитен № 13 (1318). <http://metroworld.ruz.net/trains/asyn.htm> (дата обращения 23.07.2021).
2. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт, 1991. 336 с.
3. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives // Fundamentals, Types and Applications. 5th Edition. Newnes, UK, 2019. 511 p.

4. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications // Energies. 2020, No. 13 (3). P. 700.
5. Метлицкая О.А. Электрическая тяга. Минск, 2019. 1466 с.
6. Тулупов В.Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // Электросила. 2002. Вып. 41. С. 196-210.
7. Djagarov N., Milushev H., Bonev M., Grozdev Zh., Djagarova Ju. Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives by Optimal Adaptive Observer // 7th

International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). 2020, pp. 1-5.

8. Novotny D.W., Lipo T.A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives* // Monographs in Electrical and Electronic Engineering. 1st Edition. Clarendon Press, 1996. 456 p.

9. Syed A.N. *Vector Control of AC Drives*. Routledges, NY, 2017. 256 p.

10. Mukhtar A. *High Performance AC Drives: Modeling Analysis and Control*. Springer Science & Business Media, 2010. 290 p.

11. Двигатель асинхронный тяговый ДАТЭ-170 для вагонов метрополитена. http://www.xn--80addceesnhi0axzh6mb.net/catalog.php?SECTION_ID=130&ELEMENT_ID=436 (дата обращения 25.06.2021).

References

1. Rakitin A. *Budushchee — za asinkhronnym privodom. Tekhnicheskii otdel sluzhby podvizhnogo sostava* [The Future Belongs to the Asynchronous Drive. Technical Department of Rolling Stock Service]. Peterburgskii metropoliten № 13 (1318). <http://metroworld.ruz.net/trains/asyn.htm> (accessed 23.07.2021). [in Russian].

2. Rotanov N.A., Kurbasov A.S., Bykov Yu.G., Litovchenko V.V. *Elektropodvizhnoi sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami* [Electric Rolling Stock with Asynchronous Traction Motors]. Moscow, Transport Publ., 1991. 336 p. [in Russian].

3. Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. 5th Edition. Newnes, UK, 2019. 511 p.

4. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications. *Energies*, 2020, No. 13 (3), pp. 700.

5. Metlitskaya O.A. *Elektricheskaya tyaga* [Electric Traction]. Minsk, 2019. 1466 p. [in Russian].

6. Tulupov V.D. Tyagovyi elektroprivod postoyannogo toka s nailuchshimi tekhniko-ekonomicheskimi pokazatelyami [DC Traction Electric Drive with the Best Technical and Economic Indicators]. *Elektrosila — Electric Power*, 2002, Issue 41, pp. 196-210. [in Russian].

7. Djagarov N., Milushev H., Bonev M., Grozdev Zh., Djagarova Ju. Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives by Optimal Adaptive Observer. *7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. 2020, pp. 1-5.

8. Novotny D.W., Lipo T.A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives. Monographs in Electrical and Electronic Engineering*. 1st edition. Clarendon Press, 1996. 456 p.

9. Syed A.N. *Vector Control of AC Drives*. Routledges, NY, 2017. 256 p.

10. Mukhtar A. *High Performance AC Drives: Modeling Analysis and Control*. Springer Science & Business Media, 2010. 290 p.

11. *Dvigatel' asinkhronnyi tyagovyi DATE-170 dlya vagonov metropolitena* [Asynchronous Traction Motor DATE-170 for Metro]. http://www.xn--80addceesnhi0axzh6mb.net/catalog.php?SECTION_ID=130&ELEMENT_ID=436 (accessed 25.06.2021). [in Russian].