

УДК: 629.423.31

В. В. Никитин, С. А. Гулин, Е. Г. Середа

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ПОЛОЖЕНИЯ ЭКИПАЖА С ЛИНЕЙНЫМИ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Дата поступления 23.06.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 22.12.2015

Аннотация: Для создания тяговых усилий в высокоскоростном наземном транспорте могут использоваться линейные синхронные двигатели. Для управления такими двигателями необходимо в реальном времени получать информацию о точном положении подвижной части. В статье рассматриваются варианты исполнения бесконтактных датчиков положения и скорости, применяемые в промышленности и на высокоскоростном наземном транспорте. Предложен вариант комбинированной системы определения скорости и положения для грузового Маглев.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт, линейные синхронные двигатели, датчики положения и скорости.

V. V. Nikitin, S. A. Gulin, E. G. Sereda

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

SPEED AND POSITION DETECTING SYSTEMS FOR VEHICLE WITH LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: In high-speed ground transport linear synchronous motors are used to create a traction force. Advantages of linear synchronous motors are precise control of traction force (does not depend on friction forces) and lack of wearing parts.

Linear synchronous motors control systems use block diagrams with orientation on rotor flux linkage. In such systems, information about exact position of movable part allows splitting active and reactive components of stator currents and as result independent control of motor traction force and magnetic flux. Errors in determination position can lead to errors in d–q transformation what affect calculations performed in motor model, and impact on traction force. Moreover, information on position of vehicle is also important to ensure traffic safety.

In conventional types of wheeled vehicles for determining speed and position contact probes and tachometers are used. However, in high-speed magnetic levitation transport non-contact sensors is needed. In addition, when creating control system delay in transmission of radio signals from vehicle to ground control unit should be taken into account.

This paper revives methods of speed and location detection for industry and high-speed ground transportation systems with linear synchronous motors. Also, a variant of speed and position detection system for freight Maglev was suggested.

Keywords: maglev train; linear synchronous motor; position and speed sensors.

Введение

Магнитолевитационные экипажи являются новым поколением транспорта, они используют электромагнитные усилия для создания бесконтактного подвеса и линейные синхронные двигатели для создания тяговых усилий [1]. Преимуществами линейных синхронных двигателей являются возможность точного контроля тягового усилия (не зависит от сил трения) и отсутствие изнашивающихся частей.

В системах управления линейными синхронными двигателями используются структурные схемы с ориентацией по потокосцеплению ротора. В таких системах информация о точном положении подвижной части позволяет разделить активную и реактивную составляющие токов статора и независимо контролировать создаваемое двигателем тяговое усилие и магнитный поток. Ошибки в определении положения могут привести к погрешностям при $d-q$ преобразованиях в системе управления, что повлияет на расчеты, выполняемые в модели двигателя, и скажется на тяговых усилиях. Более того, информация о положении экипажа важна также для обеспечения безопасности движения.

В традиционных типах колесного транспорта для определения скорости и положения используются контактные датчики и тахометры. Однако в высокоскоростном транспорте с магнитной левитацией необходимо применение бесконтактных датчиков. Также при создании систем управления необходимо учитывать задержку на передачу радиосигнала от экипажа до преобразователей, осуществляющих питание статора. Поэтому для определения положения используются датчики с малым периодом считывания (менее 5 мс), а для компенсации задержки при передаче используются специальные алгоритмы с интерполяцией [2].

Для определения положения в линейных двигателях используются три типа датчиков: индуктивные, магнитные и оптические [3]. Возможно также использование комбинированных систем определения положения.

Системы определения положения с оптическими датчиками

Первые датчики, использованные в высокоточных промышленных машинах, например для резки металла, были оптическими. Несмотря на то, что к настоящему времени разработаны другие технологии определения

положения, оптические датчики по-прежнему являются самыми распространенными в промышленных двигателях.

В типичных оптических датчиках используется проградуированная шкала, которая сканируется считывающей головкой (рис. 1) [3]. Используются два базовых метода создания светового сигнала: с измерением прямого сигнала (рис. 1, а); с измерением отраженного сигнала (рис. 1, б).

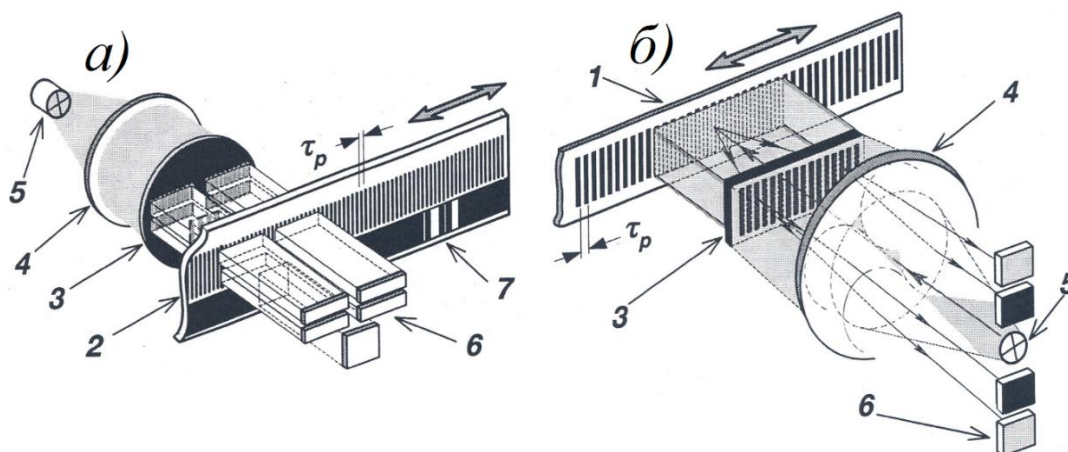


Рис. 1. Оптические датчики относительного положения:
а) метод прямого сигнала; б) метод отраженного сигнала

- 1 – отражающая шкала;
- 2 – пропускающая шкала;
- 3 – сетка;
- 4 – линза;
- 5 – источник света;
- 6 – фотодатчики,
- 7 – контрольная метка

Свет, излучаемый источником, проходит через или отражается от проградуированной шкалы, а затем считывается через идентичные в обоих случаях фотодатчики, что приводит к появлению токовых сигналов.

Наряду с рассмотренными датчиками относительного положения используются датчики абсолютного положения (рис. 2). Такие датчики используются в системах, где информация о положении не должна зависеть от перебоев в электроснабжении, или в системах, где необходимо обеспечить безопасную работу без сбоев. Каждому положению системы соответствует двоичный код. Кодовая шкала разбита на отдельные полосы, каждая из которых считывается своим фотодатчиком.

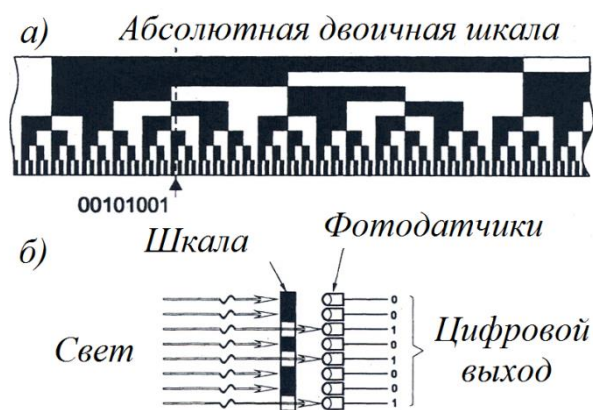


Рис. 2. Оптические датчики абсолютного положения:
а) абсолютная двоичная шкала; б) определение двоичного кода

Главным достоинством оптических датчиков является простота достижения бесконтактных измерений при высокой точности и скорости. Точность оптических датчиков соизмерима с лазерными и на несколько порядков превосходит точность магнитных и индуктивных датчиков (высокая точность достигается за счет применения шкал с очень частой градацией, τ_p рис. 1). Однако точность измерения напрямую зависит от состояния (загрязнения) размеченной шкалы, которая может быть использована только в закрытых помещениях.

Системы определения положения с магнитными датчиками

Альтернативой оптическим являются магнитные датчики. Система определения положения с магниторезистивным датчиком представлена на рис. 3 [3].

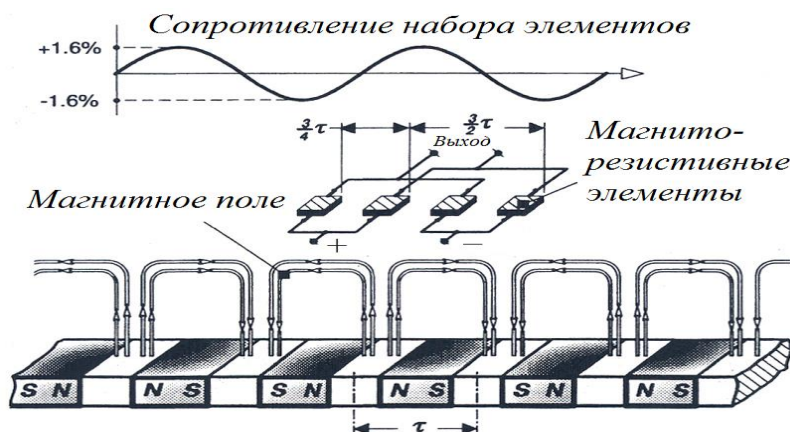


Рис. 3. Магниторезистивные датчики положения

Принцип действия основан на изменении сопротивления магниторезистивных элементов при движении вдоль шкалы с явно выраженными полюсами. Точность измерения зависит как от

полюсного деления шкалы, так и от величины воздушного зазора. Например, для обеспечения точности в 5 мм полюсное деление должно составлять 20 мм, а воздушный зазор — около 80% от полюсного деления (15 мм).

Альтернативным вариантом являются системы с датчиками на основе эффекта Холла. В таких системах датчик чаще всего движется между шкалой с явно выраженными полюсами и полосой с изменяющейся магнитной проницаемостью (структура с зубцами). Датчики на основе эффекта Холла чаще всего используются в синхронных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов (точность зависит от длины полюсного деления).

Достоинствами магнитных датчиков являются: малая чувствительность к загрязнению, низкая стоимость, низкое энергопотребление. Недостатком является необходимость применения сложной шкалы с чередующимися полюсами.

Системы определения положения с индуктивными датчиками

Наиболее часто в системах высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе применяются индуктивные датчики [4-10]. Одной из самых простых разновидностей является система с индуктивным датчиком, расположенным на тележке экипажа, основанная на считывании зубцовой структуры статора линейного двигателя, расположенной в пути (рис. 4) [4-6].

Датчик состоит из четырех 8-образных катушек (рис. 5). На катушки подается резонансный сигнал с постоянной частотой. При движении катушки вдоль зубчатого статора происходит изменение ее индуктивности, что приводит к изменению амплитуды модулирующего сигнала. На основании демодуляции получают результирующий синусоидальный сигнал (рис. 6).

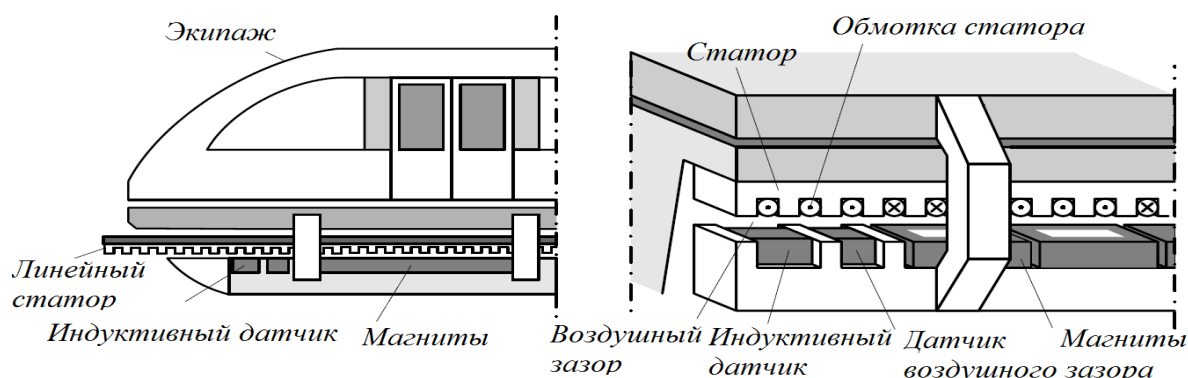


Рис. 4. Система определения положения с индуктивным датчиком

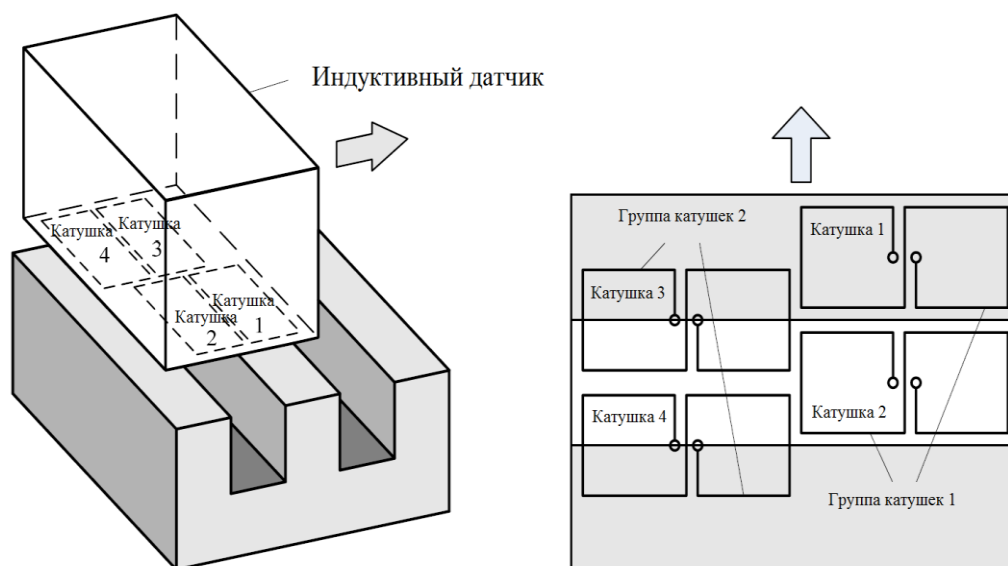


Рис. 5. Расположение катушек в датчике

Согласно относительному расположению катушек в одной группе (рис. 5), сдвиг по фазе демодулированных сигналов будет составлять 180° (рис. 6). Демодулированные сигналы подаются на вычитающие устройства для получения разностного сигнала. Разностный сигнал обладает формой более близкой к синусоиде и позволяет исключить влияние изменения сопротивления под воздействием температуры. Согласно относительному расположению четырех катушек, сдвиг по фазе двух разностных сигналов будет составлять 90° . Синусоидальные разностные сигналы в устройствах сравнения преобразуются в прямоугольные сигналы. Количество зубцовых делений, пройденных экипажем, получается на основании подсчета количества пиков прямоугольного сигнала. Направление движения экипажа определяется по фазовому сдвигу между двумя прямоугольными сигналами.

Данная система обладает существенными преимуществами, повышающими точность измерения: положение статора, с которым и должна происходить синхронизация, определяется напрямую; нет необходимости в дополнительной шкале, что исключает ошибку, связанную с ее смещением.

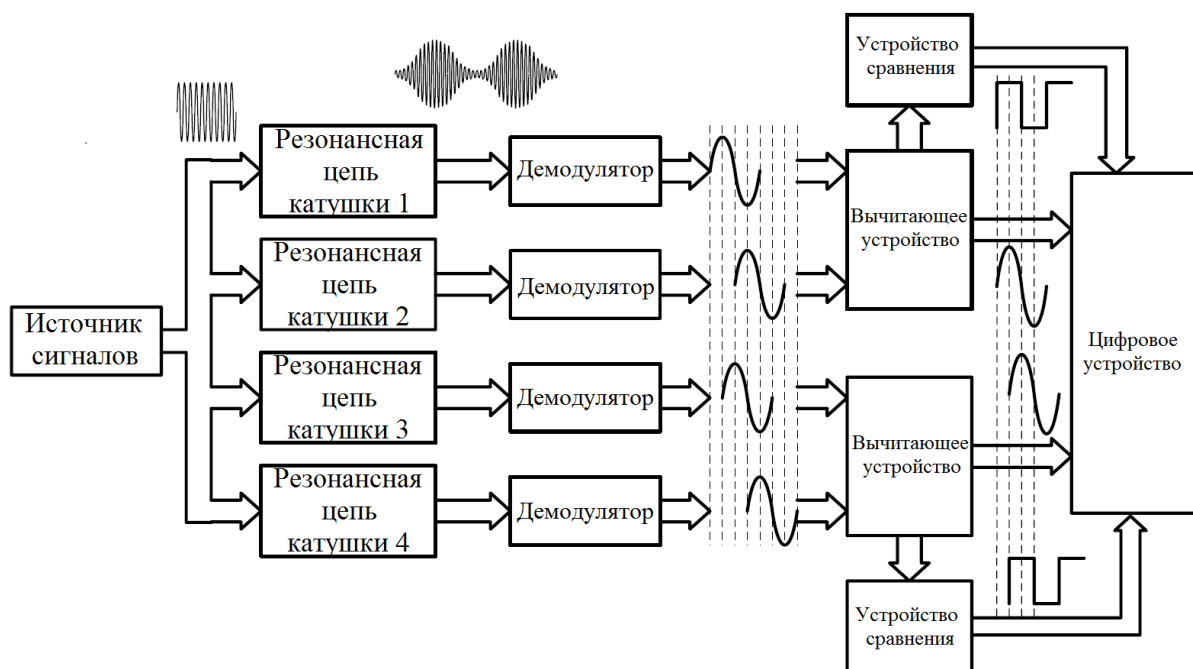


Рис. 6. Принципиальная схема работы индуктивного датчика

Рассмотренная система применима только для двигателей с ферромагнитным сердечником статора. Для определения положения безжелезных двигателей применяются пересекающиеся индуктивные кабели (рис. 7) [7, 8]. Системы на основе пересекающегося индуктивного кабеля состоят из двух частей: подсистемы возбуждения, расположенной на борту экипажа, и подсистемы датчиков определения положения, расположенной на путевой структуре. Подсистема возбуждения создает высокочастотные периодически изменяющиеся сигналы, которые поступают на передающую катушку, что приводит к образованию ЭДС в пересекающемся индуктивном кабеле, на основании которых происходит определение положения.

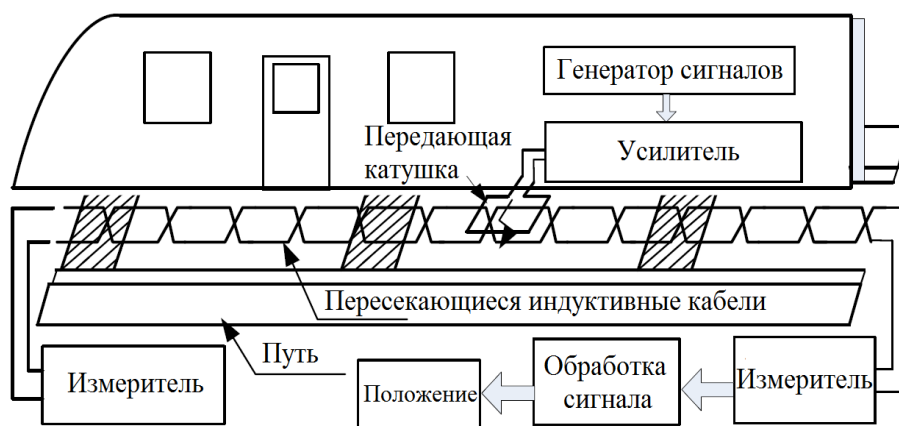


Рис. 7. Система определения положения с пересекающимся индуктивным кабелем

Рассмотрим более подробно конструкцию пересекающегося индуктивного кабеля. На рис. 8 показано поперечное сечение и расположение его проводников. Пересекающийся индуктивный кабель состоит из шести считывающих пар, каждая из которых включает скрученную и параллельную - открытую части, повторяющиеся через фиксированное расстояние. Для защиты от влаги и механических деформаций считывающие пары обмотаны скрепляющей лентой и покрыты полиэтиленом, а по бокам установлены несущие тросы. Считывающие пары, сдвинутые на полпериода, объединяются в единую группу, и в трех группах передающей катушкой наводятся трехфазные ЭДС, представленные на рис. 9. На основании полученных ЭДС и известного шага считывающих пар можно определить положение экипажа.

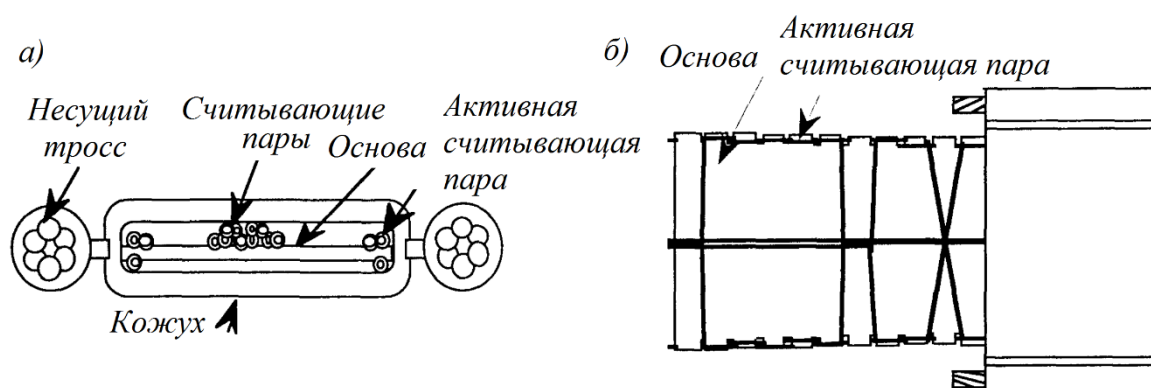


Рис. 8. Конструкция пересекающегося кабеля:
а) поперечный разрез; б) расположение проводников

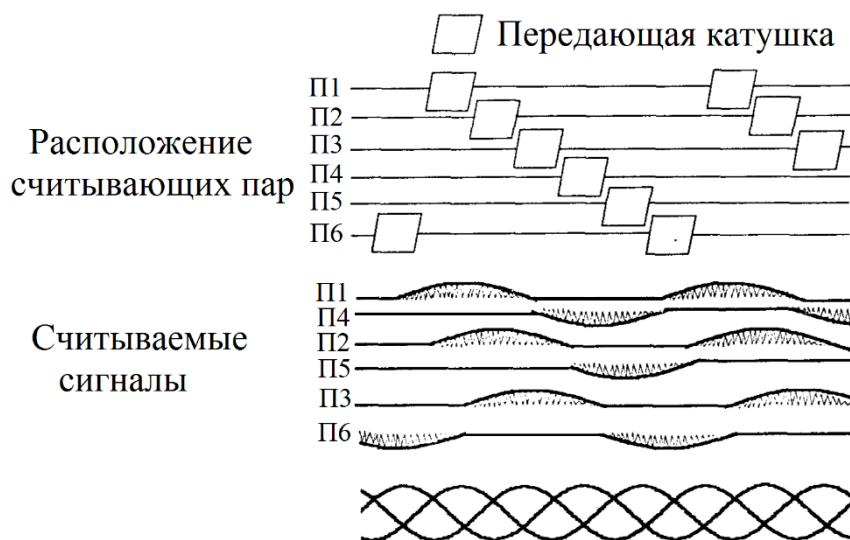


Рис. 9. Принципы определения положения

Данная система позволяет определять положение с высокой точностью, а также не требует дополнительного радиопередающего

устройства, поскольку датчики непосредственно расположены в путевой структуре. Существенным недостатком является сложность при изготовлении и эксплуатации (требуется высокая точность и качество сборки).

Рассмотренные системы с индуктивными датчиками обеспечивают только относительное измерение положения экипажа. Однако для работы систем безопасности важно определять абсолютное положение состава. Например, для определения абсолютного положения используется система считывания контрольных меток [9]. Такая система состоит из двух частей: расположенных на пути контрольных меток (рис. 10) и расположенного на экипаже считывающего устройства (рис. 11).

Пассивные контрольные метки с записанным цифровым кодом положения располагаются вдоль пути на расстоянии 200 – 1000 м. Когда экипаж проходит через контрольную метку, считывающее устройство получает цифровой код, и на его основании определяется абсолютное положение.

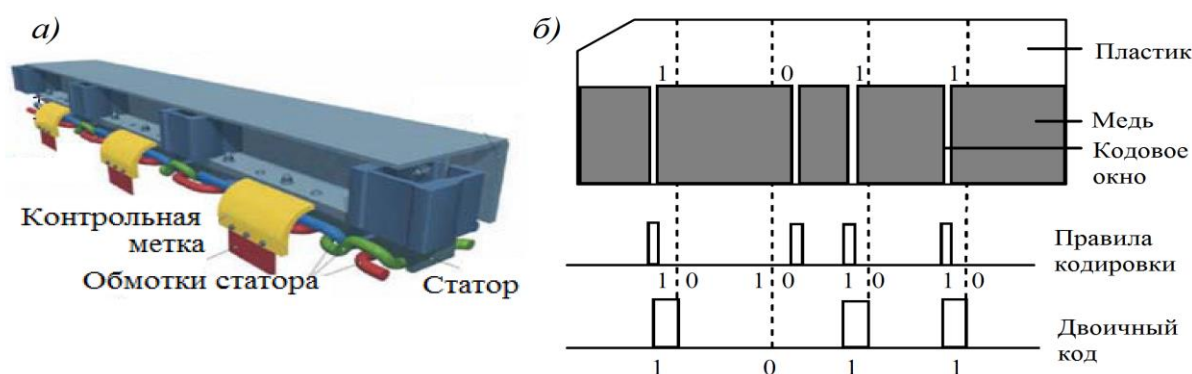


Рис. 10. Контрольная метка:

а) расположение контрольной метки на пути; б) кодировка контрольной метки

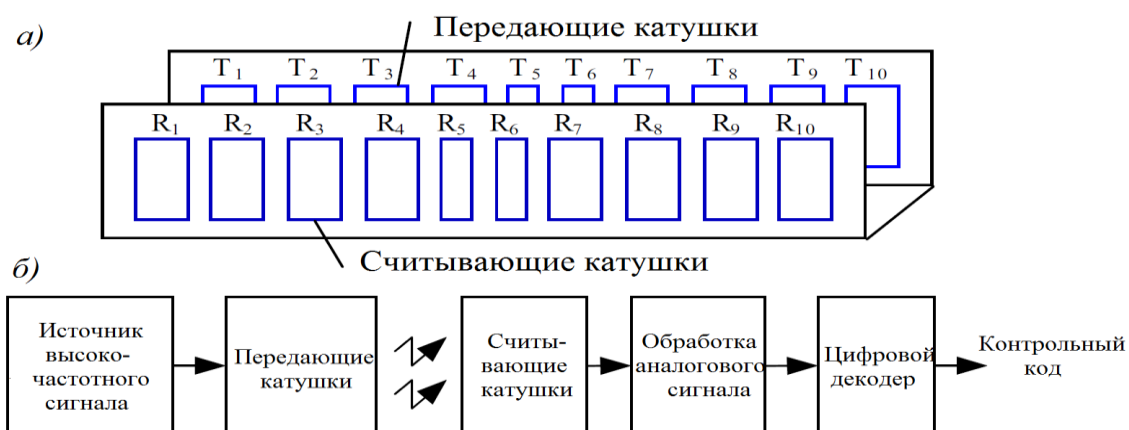


Рис. 11. Считывающее устройство:

а) расположение передающих и считывающих катушек;
б) принципиальная схема считывающего устройства

Комбинированные системы определения положения

Для увеличения надежности и уменьшения стоимости возможно применение комбинированных систем определения положения. Например, в Maglev на испытательном участке Yamanashi в Японии используется комбинированная система, представленная на рис. 12 [10]. В ней не используется дорогостоящий пересекающийся индуктивный кабель. Вместо этого она состоит из электромагнитного наблюдателя (модели двигателя с датчиками токов и напряжений статора), расположенного на колесе измерителя скорости, счетчика катушек путевой структуры и радиопередатчика. Центральный вычислитель комбинирует или выбирает полученную информацию и определяет положение и скорость, которые передаются в системы управления тяговым усилием, движением и безопасностью.

На низких скоростях движения информация от электромагнитного наблюдателя не обеспечивает необходимой точности. Поэтому до начала левитации для определения скорости используется датчик, расположенный на колесе. Информация от счетчика катушек путевой структуры используется как резерв на случай ошибки в электромагнитном наблюдателе, а также для измерения ошибки, вызванной износом резины колес.

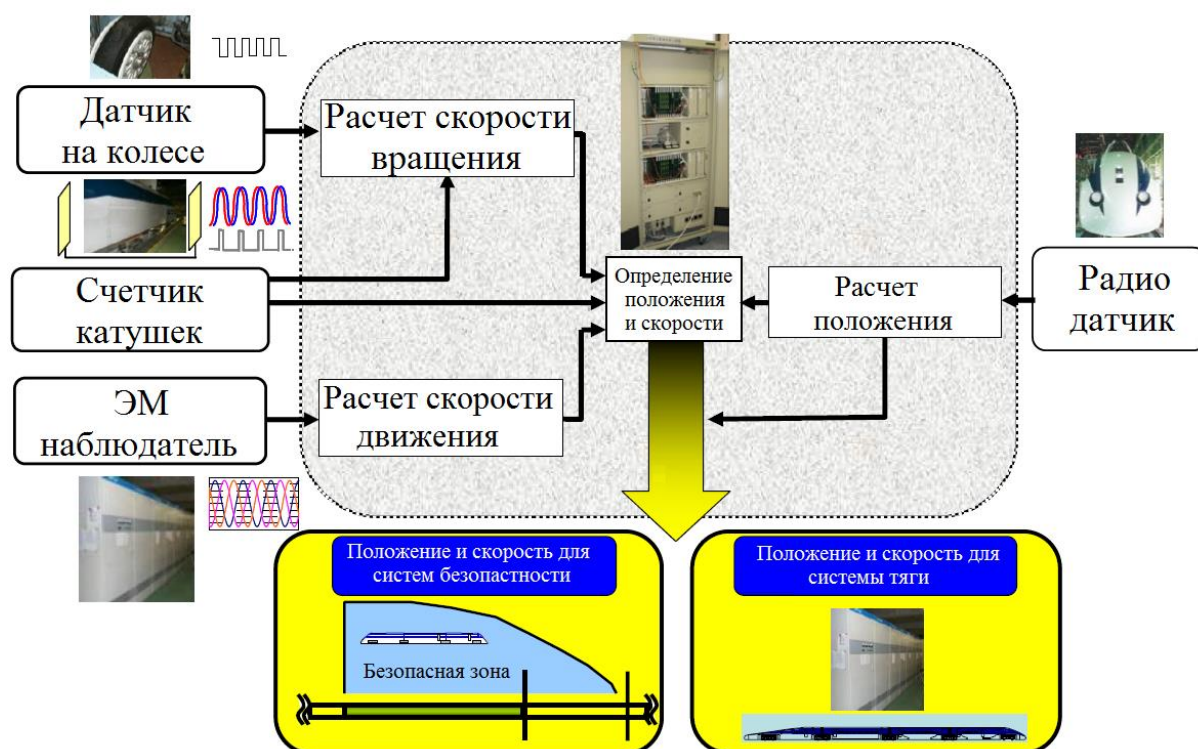


Рис. 12. Комбинированная система определения положения Maglev на испытательном участке Yamanashi в Японии

Рассмотренные подсистемы обеспечивают точное определение положения для систем создания тягового усилия, но они обеспечивают только косвенное измерение положения. Однако для работы систем безопасности важно точно определять абсолютное положение состава, поэтому используется еще одна подсистема радиоизмерения. Точность информации данной подсистемы недостаточна для управления двигателем, тем не менее она напрямую измеряет местоположение состава за счет измерения времени передачи сигнала от подвижной части до стационарных радиовышек, расположенных вдоль пути.

Система определения положения грузового маглев

На основании изложенного можно сформулировать требования к системам определения скорости и положения: простота в изготовлении и обслуживании; высокая точность и быстродействие; работа при различных погодных условиях; определение абсолютного положения экипажа для систем безопасности движения. Как было показано, наиболее полно данным требованиям соответствуют комбинированные системы определения положения.

С учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации грузового Маглева для определения положения и скорости предлагается комбинированная система, представленная на рис. 13.



Рис. 13. Комбинированная система определения положения для грузового Маглева

С одной стороны, на грузовой платформе отсутствуют источники питания [11, 12], поэтому для упрощения конструкции все датчики определения положения должны располагаться на путевой структуре. С другой стороны, для грузового Маглев требования к обеспечению безопасности движения ниже, чем к пассажирскому. Поэтому в предлагаемой системе информация о положении и скорости платформы для системы управления преобразователем, питающим путевую структуру и системы безопасности движения, определяется на основании вычислений в модели двигателя по измеренным токам и напряжениям статорной обмотки. Для контроля вычислений в модели предлагается использовать систему меток, расположенных с заданным интервалом на пути; в этом случае отсутствует необходимость в радиопередаче данных от экипажа к системам управления. Для увеличения быстродействия и уменьшения количества сбоев передачу данных от контрольных меток до системы управления предлагается осуществлять по оптическому кабелю.

Заключение

Несмотря на то, что наиболее простыми, дешевыми и распространенными в промышленности являются оптические датчики определения положения, их использование для определения положения экипажа транспортных систем невозможно из-за загрязнений шкалы и погодных условий. Для экипажей с синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов целесообразным является применение магнитных датчиков. Наиболее часто используемыми датчиками на транспорте являются индуктивные датчики. Их конструкция варьируется в зависимости от конструкции синхронного линейного двигателя.

Обычно для систем управления тяговым усилием используются датчики относительного положения, однако для работы систем безопасности необходима информация об абсолютном положении экипажа. Поэтому в современном магнитолевитационном транспорте используются комбинированные системы определения положения, что позволяет снизить стоимость и повысить точность при обеспечении высокой безопасности движения.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.

2. Caro L., Zahra N. Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor, *Energy Conversion and Management*, March, 2010.

3. Gieras J., Piech Z. Linear synchronous motors: transportation and automation systems. ISBN 0-8493-1859-9, 2000. 271 p.

4. He N., Long Z., Xue S., Dou F. Optimal Design of Detection Coil of Relative Position Detection Sensor for High Speed Maglev Train. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 29–32.

5. X. Song, C. Dai, Z. Long, Research on location and speed detection for high speed maglev train based on long stator. In *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 7–9 July 2010; Volume 7, pp. 6953–6958.

6. Dai C., Long Z., Xie Y., Song X. Research on the filtering algorithm in speed and position detection of maglev trains. *Sensors* 2011, 11, pp. 7204–7218.

7. Ono M., Sakai Y., Ohta M., Koyasu O., Tazumi K., Mita K. Development of cross-inductive cable for train location detection in the superconducting maglev train control system. *International Wire 81 Cable Symposium Proceedings* 1997, pp. 720–726.

8. Song X., Dou F., Dai C. Analysis and Design of Ground Speed and Position Detection System Based on Crossed Inductive Looped-cable. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 140–142.

9. Qian C., Han Z., Xie W. Research on Absolute positioning system for high-speed maglev train // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 922–926

10. Morishita K., Kitano J., Saegusa H., Fukukawa K. Novel Train Position Detecting System in the Yamanashi Maglev Test Line. // *MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Dresden, Germany, 2006.

11. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации / Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Сборник материалов 2-ой Международной конференции. Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17-20 июня 2014 г. / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 8–21.

12. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Корчагин А. Д., Юдкин В. Ф. Магнитолевитационная технология как транспортная стратегия грузовых и пассажирских перевозок / Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Сборник материалов 2-ой Международной научной конференции. Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17-20 июня 2014 г. / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 22–49.

References

1. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transportation technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Caro L., Zahra N. Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor, *Energy Conversion and Management*, March, 2010.
3. Gieras J., Piech Z. Linear synchronous motors: transportation and automation systems. ISBN 0-8493-1859-9, 2000. 271 p.
4. He N., Long Z., Xue S., Dou F. Optimal Design of Detection Coil of Relative Position Detection Sensor for High Speed Maglev Train. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 29-32.
5. Song X., Dai C., Long Z. Research on location and speed detection for high speed maglev train based on long stator. *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, 2010, vol. 7, pp. 6953-6958.
6. Dai C., Long Z., Xie Y., Song X. Research on the filtering algorithm in speed and position detection of maglev trains. *Sensors. Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, 2011, 11, pp. 7204-7218.
7. Ono M., Sakai Y., Ohta M., Koyasu O., Tazumi K., Mita K. Development of cross-inductive cable for train location detection in the superconducting maglev train control system. *International Wire 81 Cable Symposium Proceedings*. 1997, pp. 720-726.
8. Song X., Dou F., Dai C. Analysis and Design of Ground Speed and Position Detection System Based on Crossed Inductive Looped-cable. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 140-142.
9. Qian C., Han Z., Xie W. Research on Absolute positioning system for high-speed maglev train. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2007, pp. 922-926
10. Morishita K., Kitano J., Saegusa H., Fukukawa K. Novel Train Position Detecting System in the Yamanashi Maglev Test Line. *The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Dresden, 2006.
11. Zaitcev A. A. Kontejnernyj most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove magnitnoj levitacii [Container Bridge St. Petersburg - Moscow based on magnetic levitation]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proc. of the 2nd

Inte. Sc. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 8-21.

12. Antonov YU. F., Zajcev A. A., Korchagin A. D., Yudkin V. F. Magnitolevitacionnaya tekhnologiya kak transportnaya strategiya gruzovyh i passazhirskih perevozok [Maglev technology as a transport strategy for freight and passenger traffic] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 22-49.

Сведения об авторах:

НИКИТИН Виктор Валерьевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
E-mail: victor-nikitin@nm.ru

ГУЛИН Сергей Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

СЕРЕДА Евгений Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
E-mail: g-pereda@mail.ru

Information of authors:

Victor V. NIKITIN, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»
E-mail: victor-nikitin@nm.ru

Sergey GULIN, Ph.D., associate professor of the department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»

Eugene G. SEREDA, Ph.D., associate professor of the department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»
E-mail: g-pereda@mail.ru