

УДК 629.423

Совершенствование структуры системы управления электроприводом переменного тока с асинхронными тяговыми электродвигателями на основе микропроцессорных вычислительных устройств

Ф. А. Сорокин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сорокин Ф. А. Совершенствование структуры системы управления электроприводом переменного тока с асинхронными тяговыми электродвигателями на основе микропроцессорных вычислительных устройств // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 41–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-41-49

Аннотация

Цель: рассмотрение вопроса о совершенствовании структуры системы автоматического управления тяговым электроприводом переменного тока с асинхронными электродвигателями. Отказ от физического датчика частоты вращения колесной пары. Обзор производительности микропроцессорных вычислительных устройств в начале их появления в СССР. Обзор параметров производительности зарубежных и отечественных микропроцессорных вычислительных устройств как за рубежом, так и в России. Сравнение производительности вычислительных устройств в моменты времени их появления и на сегодняшний момент. **Методы:** сбор информации о возможных вариантах совершенствования структуры системы автоматического управления тяговым электроприводом переменного тока. Сбор информации об отечественных микропроцессорных вычислительных устройствах, применявшихся в начале их появления. Сбор информации об отечественных и зарубежных микропроцессорных вычислительных устройствах, применяющихся на сегодняшний день. Сравнение параметров производительности отечественных микропроцессорных вычислительных устройств, применявшихся в начале их появления, с устройствами, применяющимися на сегодняшний день. **Результаты:** указана возможность анализа реализации микропроцессорной СУ тяговым электроприводом с асинхронными электродвигателями без использования физического датчика частоты вращения при помощи наблюдателя состояния на основе адаптивного фильтра Люенбергера. **Практическая значимость:** заключается в получении экономической выгоды от ликвидации физического датчика частоты вращения колесной пары вследствие ликвидации затрат на производство и обслуживание.

Ключевые слова: фильтр Люенбергера, датчик частоты вращения, система управления, микропроцессорные устройства, бездатчиковый привод.

Введение

Одним из необходимых элементов системы управления (СУ) тягового привода является датчик частоты вращения колесной пары. При работе на него может влиять в худшую сторону множество факторов, такие как величины вибрации, перепады температуры окружающей среды, загрязненность воздушной среды, наводки от силовых кабелей на канал передачи информации от датчика

к процессору и т. д. [1]. Из-за некорректной работы данного датчика СУ тяговым приводом может работать некорректно, приводя до аварийных ситуаций. По этой причине возникает потребность в нахождении новых методов определения частоты вращения КП.

Одним из решений данной проблемы может являться построение наблюдателя состояния, косвенно определяющего величину частоты вращения колесной пары. В частности, в публикациях [2–4] были рассмотрены вопросы синтеза специализированных наблюдателей состояния бездатчиковых СУ тяговым приводом и получены достаточно удовлетворительные результаты по вопросам точности, не уступающие их величинам в датчиковых СУ. В конечном счете исключение датчика частоты вращения позволит вовсе исключить физический датчик частоты вращения из структуры СУ.

Однако на сегодняшний день не выяснено, есть ли вычислительные устройства (ВУ), необходимые для практической реализации, приведенные выше наблюдателей состояния. По этой причине необходимо сделать обзор ВУ, применявшихся ранее, с ныне выпускаемыми образцами для управления электроприводом локомотивов.

Реализация систем управления электроприводов переменного тока в СССР

Бурное развитие интегральных микросхем как в СССР, так и за рубежом в 70–80-х годах XX века сделало возможным реализацию первых СУ электроприводом с электродвигателями переменного тока. В СССР разработкой электропривода переменного тока занимались в Ленинградском институте инженеров транспорта имени академика В. Н. Образцова (ЛИИЖТ). В частности, над асинхронным электроприводом для тепловозов серий ВМЭ1А, ТЭ120 и 2ТЭ137 вели работы сотрудники научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) электрической тяги на переменном токе кафедры «Электрические машины» [5–7]. Конкретно для тепловоза ТЭ120 тяговый привод проектировался и реализовывался совместно с Таллинским электротехническим заводом имени М. И. Калинина (ТЭЗ) (изготовление силовых полупроводниковых элементов, шкафов инверторов и их комплектование) и Новосибирским институтом инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) (разработка системы автоматического управления тягового преобразователя ПЧТ-3У2, включавшим в себя 6 инверторов ШИ-1У2). СУ была реализована на основе схем жесткой логики с использованием микросхем серий К140 и КМ155.

Применение данных вычислительных устройств позволило осуществить первые шаги по практической реализации управления электроприводом с асинхронными электродвигателями, реализующими скалярный метод управления в режимах тяги и торможения, испытать алгоритмы управления

при работе привода в различных режимах (юз, боксование). Однако системы автоматического управления с жесткой структурой не позволяли изменить значительное число характеристик системы без изменения монтажа и печатных плат, и, как правило, системы управления с жесткой структурой включали в себя большее количество межэлементных соединений, что негативно отразилось на их надежности. Также по сравнению с микропроцессорными устройствами при разработке схем управления с жесткой логикой требовалось большее время и в конечном счете возрастала стоимость ее разработки.

По этим причинам по заданию трамвайно-троллейбусного управления Ленинграда (ТТУЛ) на кафедре «Электрическая тяга» велись работы по созданию электропривода с асинхронными электродвигателями с микропроцессорной реализацией управления для трамвайного вагона. В СССР в начале 80-х годов промышленность освоила производство микропроцессорных комплектов серий К580, К582 и К586, содержащих однокристалльные МП. Они наиболее эффективно применялись при построении устройств цифровой автоматики и простейших контроллеров. Также промышленность производила комплекты серий К536, К581, К583, К584, К587, К588 и К589, предназначавшиеся в первую очередь для построения микро-ЭВМ и сложных контроллеров.

В итоге для построения системы автоматического управления был выбран МП К580ИК80. Его общий вид **представлен на рис. 1**. Кристалл размером 4,2 x 4,8 мм содержит около 5 тыс. транзисторов и заключен в 48-вы-

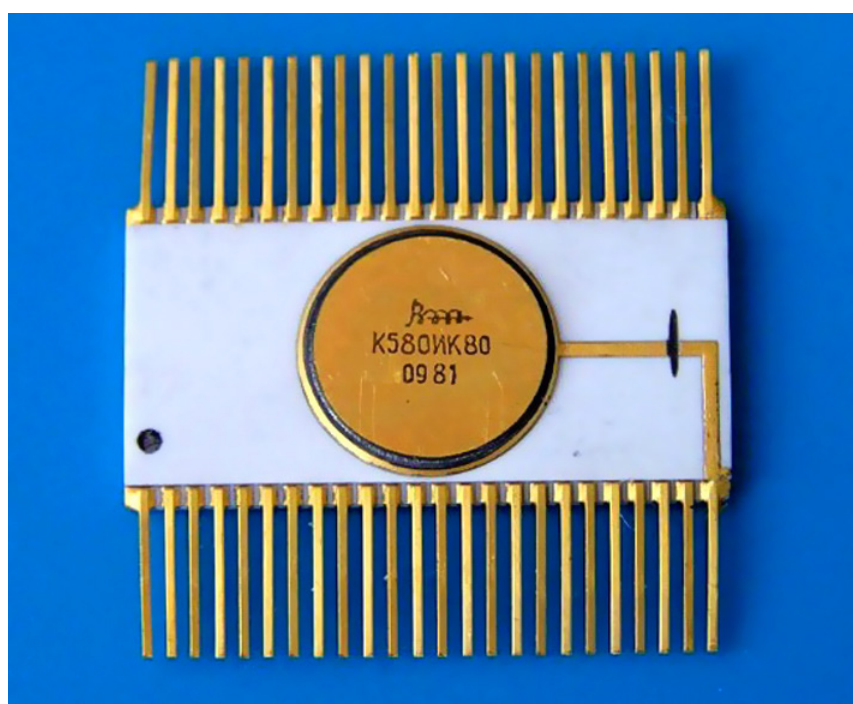


Рис. 1. Общий вид МП К580ИК80. Фото: <https://computer-museum.ru/>

водной корпус размером 30 x 35 мм. Максимальная частота МП равна 2 МГц, что соответствует длительности такта 0,5 мкс. Команды в зависимости от типа требуют для своего выполнения от 1 до 5 машинных циклов; каждый машинный цикл включает от 3 до 5 тактов. Самые простые команды, требующие обращения к памяти, выполняются в течение 1 машинного цикла за 4 такта, то есть за 2 мкс; самые длинные — в течение 5 машинных циклов за 18 тактов, то есть за 9 мкс. [8]

На его основе был реализован скалярный метод управления асинхронными тяговыми двигателями трамвая ЛМ68М. Алгоритм системы управления, построенной на микропроцессорной основе, представлен на рис. 2.

На первой ступени в МП поступает сигнал, по которому он определяет режим движения (тяга или торможение). Далее происходит измерение скорости вращения ω_i тяговых электродвигателей и в МП формируется среднее значение этой скорости $\omega_{cp} = \Sigma \omega_i / 4$ (4 — число двигателей или колесных пар в одном вагоне). В случае юза или боксования одной из колесных пар для нее не будет выполняться условие $\omega_i - \omega_{cp} \leq \omega_{dop}$ (ω_{dop} — максимально допустимая величина рассогласования) и в МП перейдет к одной из прерывающих программ в зависимости от знака рассогласования. Когда средняя скорость ω_{cp} превысит максимальную, то МП также начинает обрабатывать программу прерывания, направленную на введение в действие пневматическое торможения. В режиме электрического тормоза МП контролирует, кроме того, минимальную скорость, при достижении которой МП вырабатывает сигнал на приведение в действие пневматических тормозов. По заданным значениям скорости ω_3 и относительной частоты тока ротора β_3 МП рассчитывает заданное значение частоты тока статора $\omega'_0 = \omega_{cp} \pm \beta_3 \cdot \omega_3$. После измерения действительного значения ω_0 происходит сравнение ω_0 и ω'_0 и формируется сигнал $\Delta\omega_0$, направленный на возвращение системы в заданное положение. В зависимости от заданной кратности момента M_3 МП рассчитывает заданное значение напряжения на инверторе. Затем измеряется напряжение на тяговых двигателях U_i , формируется среднее значение U_{cp} и оценивается разность $U_i - U_{cp}$. Она не должна превышать ΔU_{dop} . МП также контролирует среднее значение U_{cp} напряжения, чтобы оно не превысило максимально допустимого U_{max} . При достижении равенства он посылает сигнал на ИРН, ограничивающий коэффициент заполнения $\lambda \leq \lambda_{max}$. После измерения напряжения на инверторе $U_{ин}$ это значение сравнивается с заданным $U_{из}$ и формируется сигнал $\Delta\lambda$, изменяющий коэффициент заполнения для возвращения системы в исходное заданное состояние. На этом очередной цикл регулирования заканчивается.

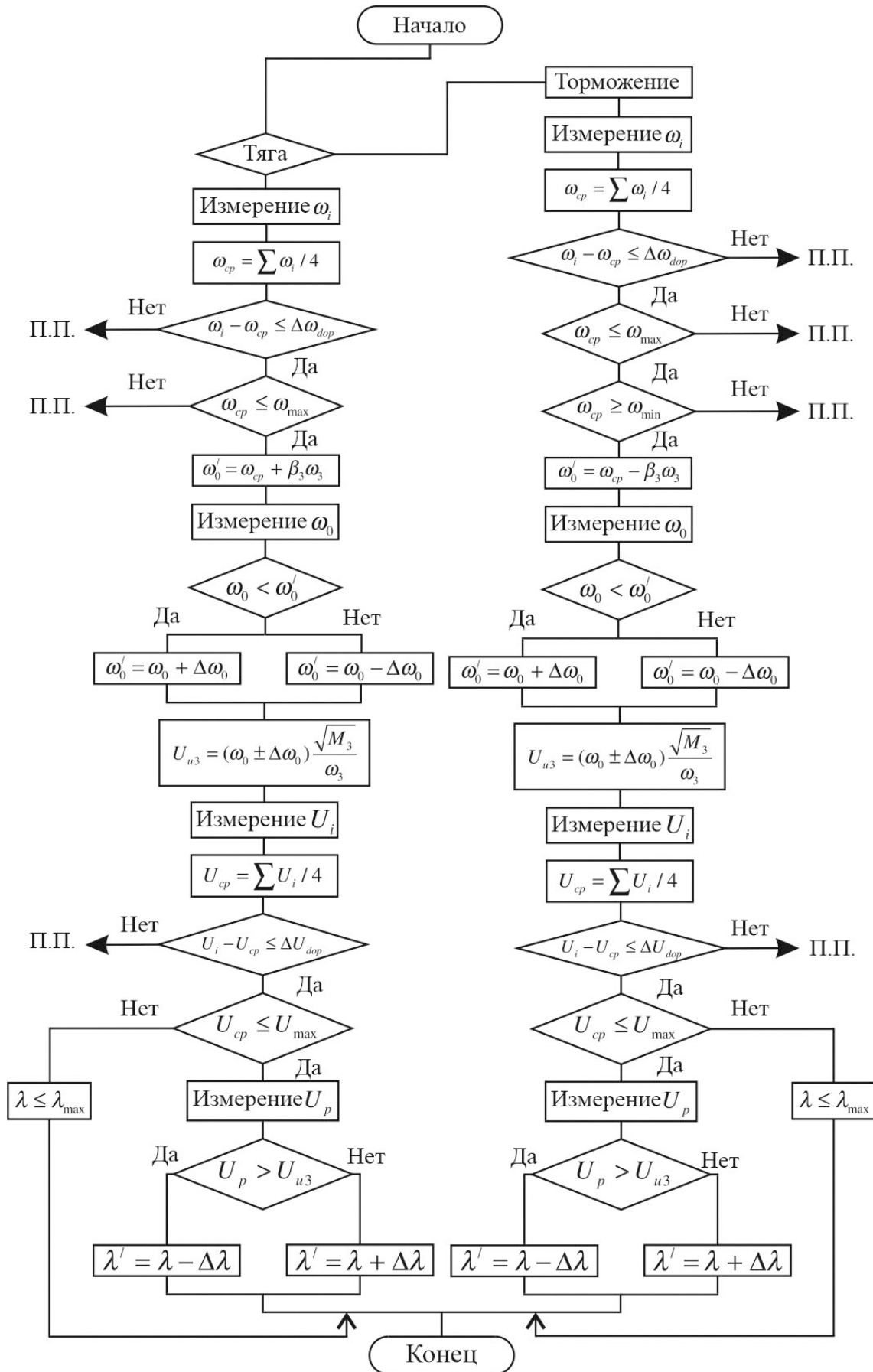


Рис. 2. Алгоритм работы МП

Современное положение дел на рынке микропроцессоров со специализированными периферийными устройствами

На сегодняшний день значительно возросло как число производителей микропроцессорной техники, так и ее номенклатура. Для решения задач управления электроприводами у различных производителей существуют отдельные модели микроконтроллеров. Наиболее распространенными компаниями на рынке, выпускающими микроконтроллеры и микропроцессоры для нужд автоматизации электропривода, являются STMicroelectronics, Texas Instruments, АО «ПКК «Миландр», АО НИИЭТ и АО «Микрон». Основные параметры наиболее производителей микроконтроллеров приведены в табл. 1 [9–13].

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры микроконтроллеров

Обозначение модели	Производитель	Страна	Тактовая частота, МГц	Разрядность, бит
K1967	АО «ПКК «Миландр»	Россия	230	32
K1986	АО «ПКК «Миландр»	Россия	144	32
K1946	АО НИИЭТ	Россия	200	32
K1921	АО НИИЭТ	Россия	32	32
K1948	АО «Микрон»	Россия	32	32
STM32FXxxx	STMicroelectronics	Швейцария	216	32
STM32Hxxx	STMicroelectronics	Швейцария	550	32
TMS320Xxxx	Texas Instruments	США	200	32
MSP430Fxxx	Texas Instruments	США	25	16
MSPM0Xxxx	Texas Instruments	США	80	32
AM2XXXx	Texas Instruments	США	800	32

На основе параметров из приведенной таблицы видно, что по сравнению с частотой тактирования МП К580ИК80, составлявшей 2 МГц, ее значение для лучших образцов микроконтроллеров выросло в 400 раз. Тем самым можно говорить о значительном росте их производительности.

Заключение

За последние 40 лет производительность микропроцессоров выросла в разы и тем самым открывается возможность для анализа реализации микропроцессорной СУ тяговым электроприводом с асинхронными электродвигателями без использования физического датчика частоты вращения при помощи наблюдателя состояния на основе адаптивного фильтра Льюенбергера. Отказ физического датчика частоты вращения позволит отказаться от монтажа как канала связи датчика с вычислительным устройством, так и самого датчика, тем самым сэкономить

средства, необходимые для оплаты труда персонала. Также его отсутствие позволит экономить средства, необходимые на оплату рабочих, осуществляющих его демонтаж, обслуживание и монтаж при различных видах ремонта.

Библиографический список

1. Датчики частоты вращения для подвижного состава // Железные дороги мира. 2007. № 5. С. 55–58.
2. Колодин И. Ю. Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // Электричество. 2007. № 1. С. 44–50.
3. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Воронко А. Б. и др. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. Т. 19, № 3. С. 137–141.2
4. Колпахчян П. Г., Пахомин С. А., Кочин А. Е. и др. Наблюдатель состояния асинхронного тягового двигателя на базе фильтра Люенбергера // Интеллектуальные информационные технологии для промышленности. The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG, 2023. — С. 260–270.
5. Совершенствование электропередачи переменного тока на базе макетного маневрового тепловоза ВМЭ1А-024. Разработка принципиальных схем тепловоза и технических требований к стенду: отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Пармас Я. Ю.; исполн.: Белов А. М., Балычев П. К., Грищенко А. В. Ленинград, 1981. 148 с. Библиогр.: с. 139. № ГР 80021150. Инв. № 0282.0060612.
6. Тягово-энергетические испытания тепловоза ТЭ120 с электропередачей переменного тока. Исследование опытного шкафа автономного инвертора типа ШИ-1БУ2 на стенде ЛИИЖТа и разработка системы управления и защиты на основе интегральных микросхем : отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Комаров Ю. И.; исполн.: Тимофеев Б. А., Бурков А. Т., Гришуков Л. С. Ленинград, 1977. 200 с. Библиогр.: с. 185. № ГР 72037156. Инв. № 637828.
7. Участие в эксплуатационных испытаниях выпрямительно-инверторного преобразователя тепловоза 2ТЭ137 : отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Пармас Я. Ю.; исполн.: Горбатенко В. И., Чернов С. С., Беркович Е. И. Ленинград, 1991. 86 с. Библиогр.: с. 55. № ГР 01920009786. Инв. № 0292.0009677.
8. Разработка принципиальных схем асинхронного электропривода трамвая: отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Некрасов В. И.; исполн.: Ляменков В. Т., Рогов А. Н., Гаврилов Б. П. Ленинград, 1983. 190 с. Библиогр.: с. 158. № ГР 81037298. Инв. № 0284.0036324.
9. Microcontrollers & microprocessors // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors.html> (дата обращения: 24.02.2024).
10. Microcontrollers (MCUs) & processors // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/info/contact-us.html> (дата обращения: 24.02.2024).
11. Микроконтроллеры и процессоры // Миланр. URL: <https://milandr.ru/?ysclid=lsz64bihyu680982892> (дата обращения: 24.02.2024).
12. Интегральные микросхемы // НИИЭТ. URL: <https://niiet.ru/> (дата обращения: 24.02.2024).

13. Микроконтроллеры и транзисторы для гражданского рынка // mikron. URL: <https://mikron.ru/?ysclid=lsz69gw3mo401439020> (дата обращения: 24.02.2024).

Дата поступления: 22.01.2024

Решение о публикации: 25.02.2024

Контактная информация

СОРОКИН Филипп Александрович — аспирант; filippovna1965@mail.ru

Improving the structure of the control system for an AC electric drive with asynchronous traction motors based on microprocessor computing devices

F. A. Sorokin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Sorokin F. A. Improving the structure of the control system for an AC electric drive with asynchronous traction motors based on microprocessor computing devices // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 41–49. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-41-49

Abstract

Objective: consideration of the issue of improving the structure of the automatic control system for an AC traction electric drive with asynchronous electric motors. Abandonment of the physical wheelset speed sensor. An overview of the performance of microprocessor computing devices at the beginning of their appearance in the USSR. An overview of the performance parameters of foreign and domestic microprocessor computing devices both abroad and in Russia. Comparison of the performance of computing devices at the time of their appearance and at the present moment. **Methods:** collecting information on possible options for improving the structure of the automatic control system for an AC traction electric drive. Collecting information about domestic microprocessor computing devices used at the beginning of their appearance. Collection of information on domestic and foreign microprocessor computing devices used today. Comparison of performance parameters of domestic microprocessor computing devices used at the beginning of their appearance with devices used today. **Results:** the possibility of analyzing the implementation of a microprocessor control system by a traction electric drive with asynchronous electric motors without using a physical speed sensor using a state observer based on an adaptive Luenberger filter is indicated. **Practical importance:** it consists in obtaining economic benefits from the elimination of the physical speed sensor of the wheelset as a result of the elimination of production and maintenance costs.

Keywords: Luenberger filter, speed sensor, control system, microprocessor devices, sensorless drive.

References

1. Datchiki chastoty vrashcheniya dlya podvizhnogo sostava // ZHeleznye dorogi mira. 2007. № 5. S. 55–58. (In Russian)
2. Kolodin I. Yu. Bez datchikovyj asinhronnyj elektroprivod s adaptivno-vektornoj sistemoy upravleniya // Elektrichestvo. 2007. № 1. S. 44–50. (In Russian)

3. Peresada S. M., Kovbasa S. N., Voronko A. B. i dr. Cravnitel'noe eksperimental'noe testirovanie sistem bezdatchikovogo upravleniya asinhronnymi dvigatelyami // Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi. 2012. T. 19, № 3. S. 137–141.2 (In Russian)

4. Kolpahch'yan P. G., Pahomin S. A., Kochin A. E. i dr. Nablyudatel' sostoyaniya asinhronnogo tyagovogo dvigatelya na baze fil'tra Lyuenbergera // Intellektual'nye informacionnye tekhnologii dlya promyshlennosti. The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG, 2023. S. 260–270. (In Russian)

5. Sovershenstvovanie elektroperedachi peremennogo toka na baze maketnogo manevrovogo teplovoza VME1A-024. Razrabotka principial'nyh skhem teplovoza i tekhnicheskikh trebovanij k stendu: otchet o NIR / LIIZHT; ruk. Parmas YA. YU.; ispoln.: Belov A. M., Balychev P. K., Grishchenko A. V. Leningrad, 1981. 148 s. Bibliogr.: s. 139. № GR 80021150. Inv. № 0282.0060612. (In Russian)

6. Tyagovo-energeticheskie ispytaniya teplovoza TE120 s elektroperedachej peremennogo toka. Issledovanie opytnogo shkafa avtonomnogo invertora tipa SHI-1BU2 na stende LIIZHTa i razrabotka sistemy upravleniya i zashchity na osnove integral'nyh mikroskhem: otchet o NIR / LIIZHT; ruk. Komarov Yu. I.; ispoln.: Timofeev B. A., Burkov A. T., Grishukov L. S. Leningrad, 1977. 200 s. Bibliogr.: s. 185. № GR 72037156. Inv. № 637828. (In Russian)

7. Uchastie v ekspluatacionnyh ispytaniyah vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya teplovoza 2TE137: otchet o NIR / LIIZHT ; ruk. Parmas YA. YU.; ispoln.: Gorbatenko V. I., Chernov S. S., Berkovich E. I. Leningrad, 1991. 86 s. Bibliogr.: s. 55. № GR 01920009786. Inv. № 0292.0009677. (In Russian)

8. Razrabotka principial'nyh skhem asinhronnogo elektroprivoda tramvaya: otchet o NIR / LIIZHT ; ruk. Nekrasov V. I.; ispoln.: Lyamenkov V. T., Rogov A. N., Gavrilov B. P. Leningrad, 1983. 190 s. Bibliogr.: s. 158. № GR 81037298. Inv. № 0284.0036324. (In Russian)

9. Microcontrollers & microprocessors // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors.html> (data obrashcheniya: 24.02.2024).

10. Microcontrollers (MCUs) & processors // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/info/contact-us.html> (data obrashcheniya: 24.02.2024).

11. Mikrokontrollery i processory // Milanr. URL: <https://milandr.ru/?ysclid=lsz64bihyu680982892> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

12. Integral'nye mikroskhemy // NIJET. URL: <https://nietet.ru/> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

13. Mikrokontrollery i tranzistory dlya grazhdanskogo rynka // mikron. URL: <https://mikron.ru/?ysclid=lsz69gw3mo401439020> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

Received: 22.01.2024

Accepted: 25.02.2024

Author's information:

Filipp Al. SOROKIN – postgraduate student; filippovna1965@mail.ru