

Саяпина П. О., Ефремов М. А., Крупский Р. Ф., Азимов Х. Х.
P. O. Sayarina, M. A. Efremov, R. F. Krupsky, Kh. Kh. Azimov

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ELECTROMECHANICAL INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

Саяпина Полина Олеговна – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: em@knastu.ru.

Polina O. Sayarina – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-na-Amur). E-mail: em@knastu.ru.

Ефремов Михаил Андреевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: em@knastu.ru.

Mikhail A. Efremov – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: em@knastu.ru.

Крупский Роман Фаддеевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – «КнААЗ имени Ю. А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Roman F. Krupsky – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «УАК» – «КнААЗ named after Yu. A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, st. Sovetskaya 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Азимов Хурсандмурод Хакимович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: керару@knastu.ru.

Khursandmurod Kh. Azimov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: керару@knastu.ru.

Аннотация. Показана актуальность разработки и внедрения измерительной электромеханической системы. Приведена методика функционального применения электромеханической системы посредством асинхронного двигателя. Описан порядок выбора выходных параметров асинхронного двигателя, и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводятся описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

Summary. The relevance of the development and implementation of a measuring electromechanical system is shown. The method of functional application of an electromechanical system by means of an asynchronous motor is given. The procedure for selecting the output parameters of an asynchronous motor is described and the stages of research work are shown. A description of the block diagram and the purpose of the main blocks and modules is given.

Ключевые слова: проектирование, электромеханическая система, система взвешивания.

Key words: design, electromechanical system, weighing system.

УДК 621.313:621.317.39

Введение. Создание информационно-измерительных систем (ИИС) неразрывно связано с их автоматизацией. Это не только снижает трудоёмкость испытаний, но и обеспечивает встраивание измерительных модулей в производственный процесс для непрерывного мониторинга технологических параметров и удалённой корректировки программы измерений [1–3].

Основным классификационным критерием ИИС является принцип организации алгоритма её функционирования. Для исследования технических объектов, эксплуатируемых в статических режимах, применяются ИИС с детерминированными алгоритмами, реализующими стандартные метрологические подходы. Объектам с динамическими режимами работы в большей степени соответствуют программируемые ИИС, учитывающие параметры состояния контролируемого устройства или процесса. Наиболее сложными и универсальными являются адаптивные ИИС, структура и алгоритм работы которых автоматически изменяются в соответствии с измеряемыми величинами.

Независимо от классификации ИИС при их синтезе возникает необходимость решения задачи комплексной совместимости. Она включает информационную, конструкционную, энергетическую, метрологическую и эксплуатационную согласованность характеристик всех структурных блоков и характеристик, учитывающих влияние внешних факторов. Если ИИС выполнена в виде информационно-измерительного комплекса (ИИК), вопросы совместимости функционально объединённой совокупности компьютеров и средств измерений, предназначенных для измерительной задачи, решаются в процессе проектирования. Характерным признаком комплекса является наличие логических программируемых блоков (ПЛИС) и программного управления измерениями, реализованного, как правило, на аппаратном уровне. Например, для блочно-модульной структуры, состоящей из технической (аппаратной) ПЛИС Алтера MAX7000+plus, необходимо программное (алгоритмическое) обеспечение Алтера HDL.

Техническая подсистема включает систему измерений, вычислительные компоненты, таймеры, средства ввода/вывода цифровых и аналоговых сигналов.

Программная подсистема содержит системное и прикладное обеспечение, определяющее вычислительные характеристики комплекса. В частности, оно реализует поведенческие алгоритмы представления и обработки потоковых данных, планирования эксперимента, архивирования и метрологического сопровождения.

Измерительно-вычислительный комплекс обеспечивает управляемые прямые и/или косвенные измерения, преобразование электрических сигналов от измерительных приборов, генерацию нормированных сигналов, представление результатов измерений.

Структура ИИК хотя и зависит от типа решаемой задачи, но однозначно включает компьютер (терминал, программируемый контроллер) с соответствующими периферийными устройствами, использующий алгоритмически разноуровневые взаимосвязанные программы. Обработка и передача измерительной информации реализуются с помощью внешних или интегрированных модулей сопряжения бинарных сигналов (цифро-аналоговый, аналого-цифровой преобразователи, мультиплексоры, шифраторы и т. п.).

Автоматизация ИИК технически сводится к выбору режима объекта измерений (установка, подключение, перемещение, отключение), режима процесса измерений, сбора, передачи, обработки, хранения данных, созданию экспертной базы данных. ИИК представляет класс измерительных средств высокой сложности, поскольку включает цифровые и аналоговые компоненты с согласованными в соответствии с требованиями их совместного использования в многоблочных информационно-измерительных системах техническими и эксплуатационными характеристиками.

Для решения унитарных задач автоматизации измерений предназначены типовые комплексы. Проблемно ориентированные ИИК обеспечивают решение специфичных для прикладной области задач. На решение уникальных и мультифизических задач автоматизации измерений направлены специализированные ИИК.

Предмет исследования. Предметом исследования, обеспечивающим решение метрологической задачи определения весовых и/или триботехнических характеристик, является электромеханическая система на базе автоматически тарированного асинхронного электродвигателя двойного движения. Целесообразность такого технического решения подтверждается исследованиями, выполненными как в нашей стране, так и за рубежом [4–21]. Одна из первых реализаций, обеспечивающих двойное движение исполнительного механизма, это двигатель-электромолоток А. И. Москвитина [22].

В рассматриваемой системе определяющими являются силы, действующие на перемещаемый объект. Из основных положений электромеханики следует, что силы, возникающие вследствие взаимодействия переменного магнитного поля статора с током вторичной короткозамкнутой обмотки, при детерминированных размерных соотношениях электромеханического преобразователя определяются его электромагнитными параметрами [23–25].

Задачами информационно-измерительной электромеханической системы являются определение массы исследуемого объекта и защита от возможной перегрузки.

Технический результат, достигаемый в процессе решения поставленной задачи, заключается в повышении функциональности и надёжности измерительной системы.

Величина силы, действующей на перемещаемый объект, в общем случае может быть найдена на основании уравнения Лагранжа первого рода:

$$m_v \cdot w_v = F_v \sum_{\alpha=1}^r \lambda_{\alpha} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial r_v} + \sum_{\beta=1}^r R_{v\beta}, \quad (1)$$

где m_v – масса объекта; w_v – ускорение объекта; F_v – равнодействующая сила; $R_{v\beta}$ – реакция силы.

Выражение вращающего момента, действующего в измерительной системе, может быть получено на основе общих уравнений динамической системы (Лагранжа II рода):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{\sigma}} - \frac{\partial T}{\partial q_{\sigma}} = Q_{\sigma}, \quad (2)$$

где q_{σ} – обобщённые координаты; \dot{q}_{σ} – обобщённые скорости; T – кинетическая энергия системы; Q_{σ} – обобщённые силы.

Уравнения Лагранжа (1), (2) позволяют обобщить связь объекта измерения и приложенные к нему силы. Поскольку механическое усилие создаётся электромагнитным моментом $M_{эм}$, развиваемым электромеханическим преобразователем, в данном случае асинхронным двигателем, величина момента будет определяться электрическими параметрами подведённой к нему электрической мощности:

$$M_{эм} = \frac{p m_1 \Delta U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left((r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2 \right)},$$

где p – число пар полюсов; m_1 – число фаз; ΔU_1 – изменение напряжения вследствие перемещения объекта измерения; c_1 – численный коэффициент приведения схемы замещения; r_1, r_2' – активные сопротивления; $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$ – индуктивные сопротивления статора и ротора двигателя.

Принцип работы измерительной системы поясняет рис. 1, на котором приведены следующие обозначения: БУ – блок управления, ЧП – частотный преобразователь, Д – асинхронный двигатель с линейным перемещением исполнительного элемента, ДД – датчик движения, ДТ – датчик тока, ВЧ – программируемое логическое устройство («вычислитель»), БВИ – блок вывода информации величин « m » или коэффициента трения « μ » объекта измерений, ИВП – измерительная весовая платформа (передвижная платформа).

Электродвигатель с линейным перемещением исполнительного элемента состоит из магнитопровода с сетевой обмоткой, подключаемой к сети через частотный преобразователь ЧП и блок управления БУ, вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, на наружной поверхности также нанесена резьба с образованием между вращающейся вторичной обмоткой и тягой резьбового соединения, обеспечивающего при вращении вторичной обмотки перемещение тяги в осевом направлении, при этом один из концов тяги механически присоединён к измерительной весовой платформе.

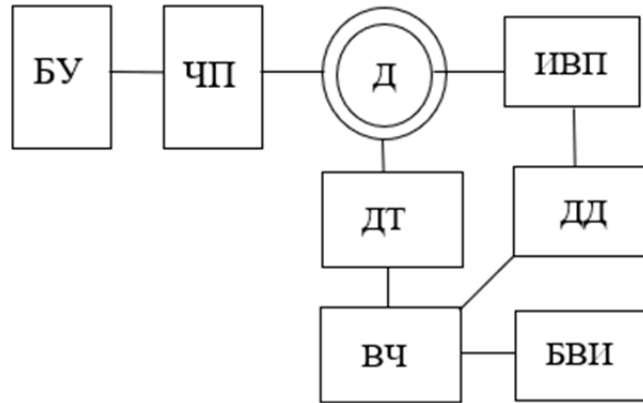


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной электромеханической системы

Информационно-измерительная электромеханическая система использует датчики наблюдаемых электрических параметров, включаемые в количество фаз трёхфазной сети, определяемое используемой схемой измерения электрических величин (одно-, двух- или трёхфазное подключение). Датчики информационно связаны с программируемым вычислительным устройством, в которое внесена начальная информация о параметрах электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента (без механического соединения с объектом измерений), жёстко закреплённого на опорной поверхности.

Вычислительное устройство также содержит информацию о допустимых значениях параметров электродвигателя. Для вывода результатов измерений используется блок вывода информации.

Практическая реализация рассматриваемого подхода условно показана на примере схемы определения веса грузового автомобиля (см. рис. 2).

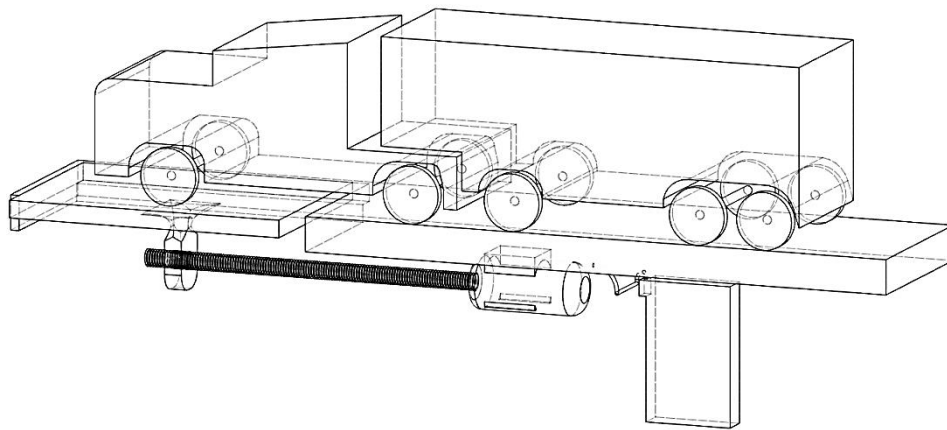


Рис. 2. Функциональная модель измерительной системы

В процессе измерений при получении информации от измерительных датчиков для определения массы вычислительное устройство использует выражение

$$m = \frac{pm_1 \Delta U_1^2 r_2'}{g \mu \pi f_1 d_p \Delta s \left((r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2 \right) \left(\frac{D_{cp}}{d} f + \operatorname{tg}(\theta + \varphi) \right)}; \quad (3)$$

для вычисления коэффициента трения

$$\mu = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{g m \pi f_1 d_p s \left((r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2 \right) \left(\frac{D_{cp}}{d_p} f + \text{tg}(\theta + \varphi) \right)}, \quad (4)$$

где g – ускорение силы тяжести; D_{cp} – приведённый диаметр сил трения в резьбовой части; f – коэффициент трения в резьбовой части; θ – угол подъёма резьбы; φ – угол трения в резьбе.

В выражениях (3), (4) технические характеристики двигателя без механического соединения тяги с измерительной платформой определяются из справочных данных или находятся по стандартной методике.

Технические характеристики двигателя, измеренные датчиком при перемещении объекта измерений и входящие в приведённые выше формулы, поступают из блока датчиков.

Рассчитанные на основе сравнения предварительно внесённой информации и текущего значения параметров состояния электродвигателя в «вычислителе» значения массы и/или коэффициента трения передаются на блок вывода информации. Реализация блока «вычислитель» средствами пакета LabVIEW показана на рис. 3.

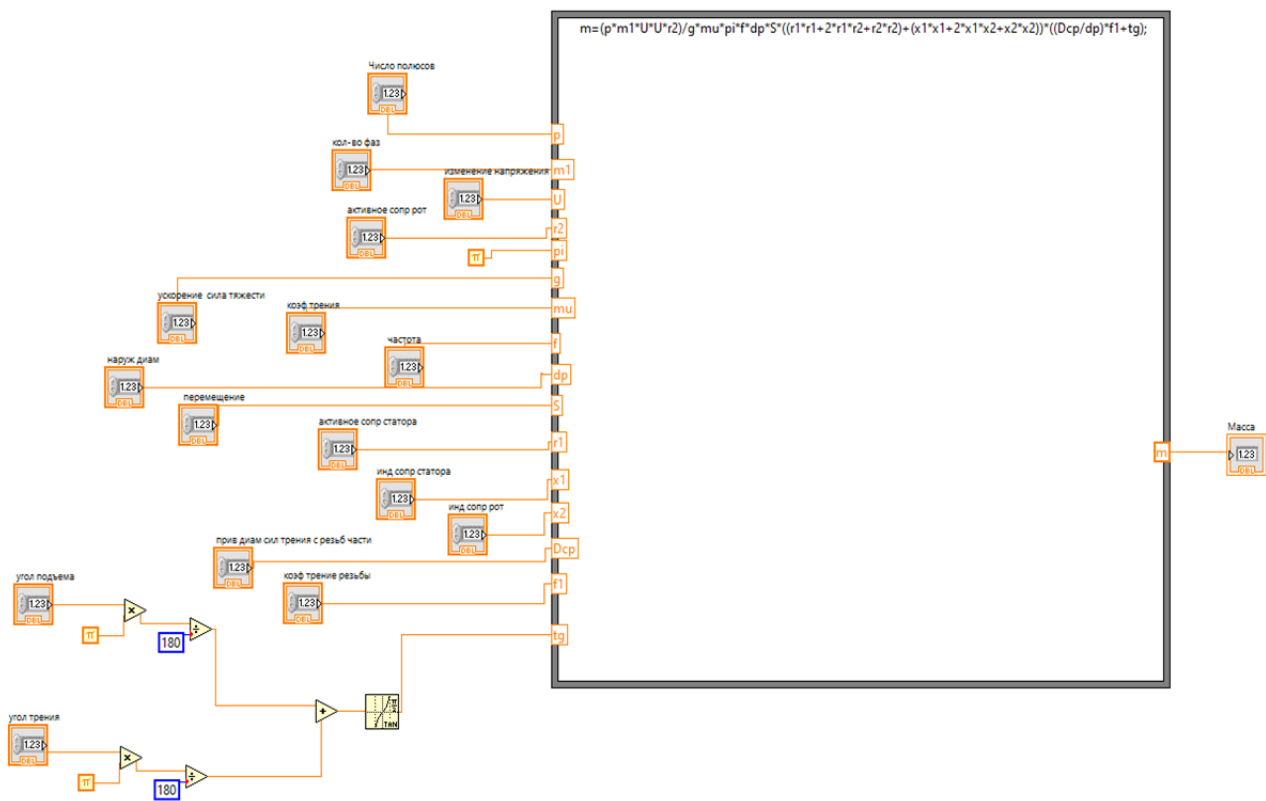


Рис. 3. Мнемоническая схема «вычислитель»

Математическая модель «Вычислитель», реализованная в пакете MATLAB, приведена на рис. 4-5.

Если в процессе перемещения двигателем измерительной весовой платформы измеренные блоком датчиков тока параметры электродвигателя превысили предельно допустимые значения, программируемый частотный преобразователь автоматически формирует сигнал блоку управления, который отключает электродвигатель от сети.

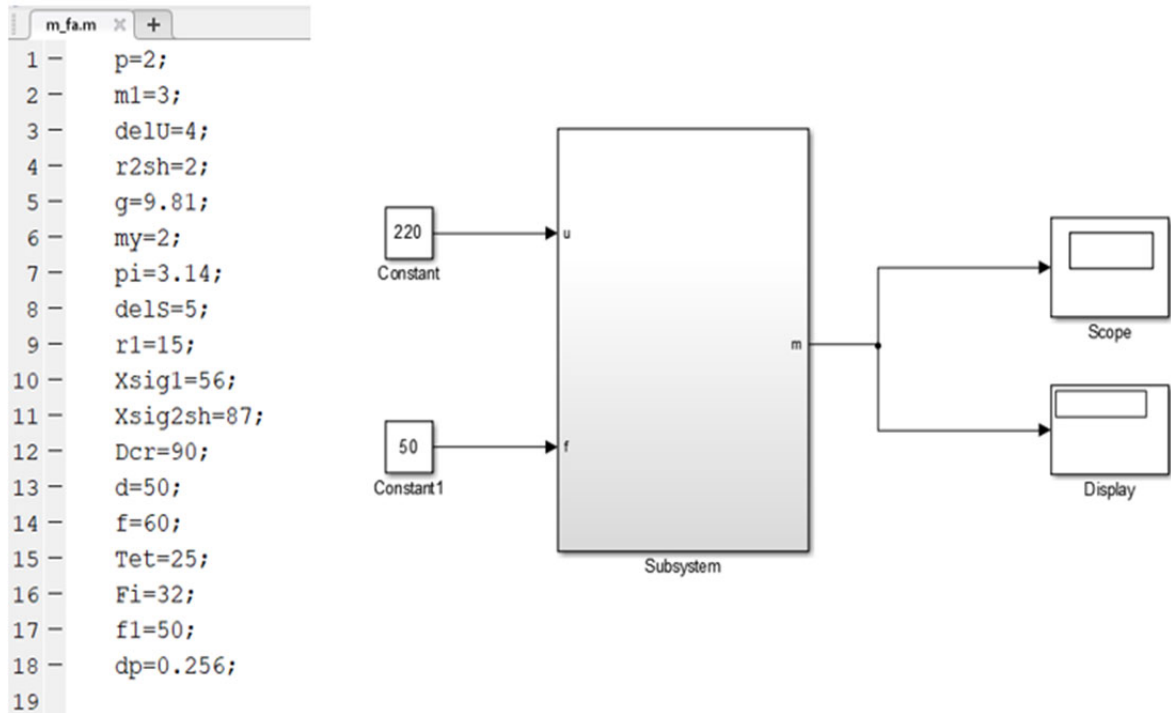


Рис. 4. Математическая модель в пакете MATLAB

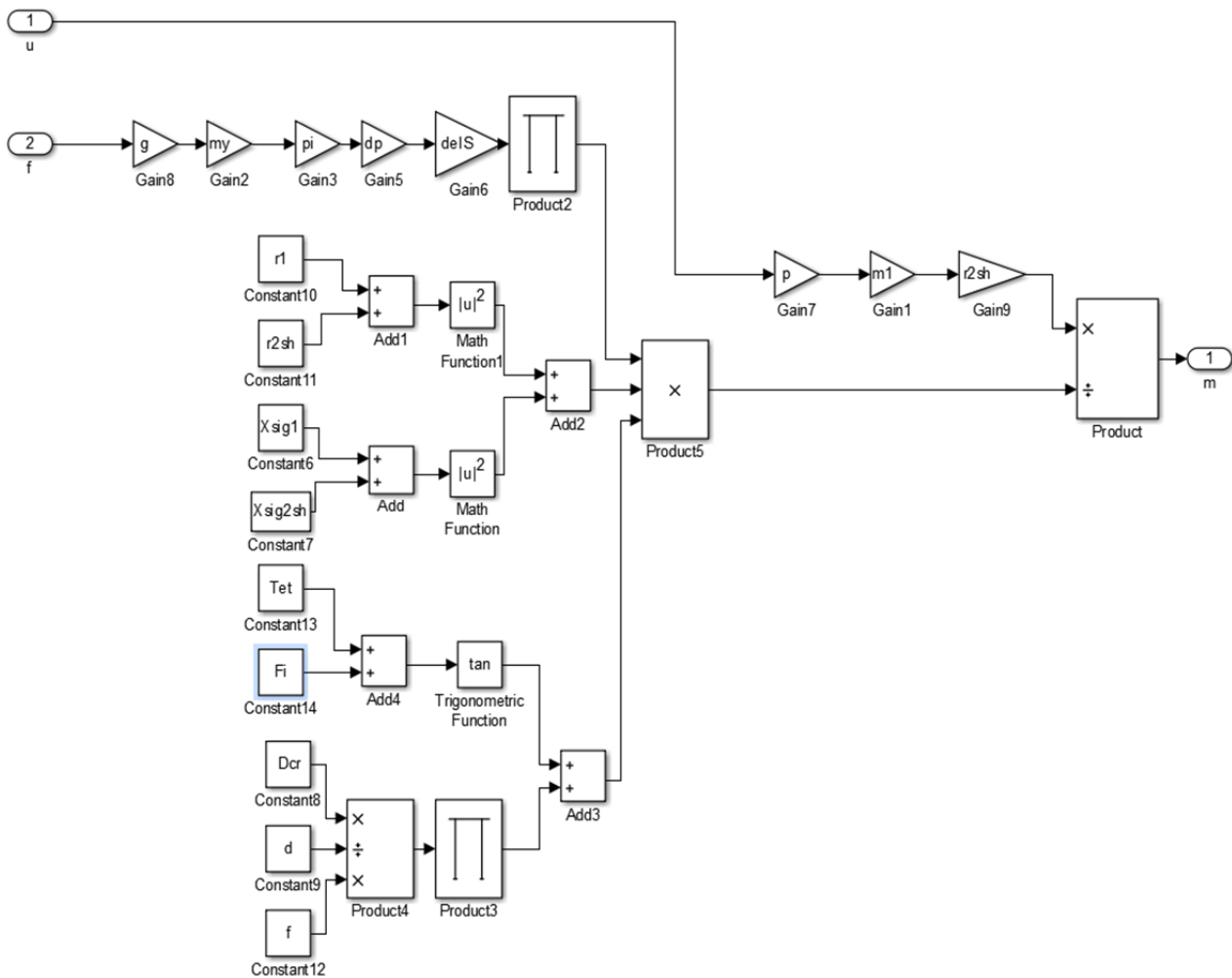


Рис. 5. Математическая модель в пакете MATLAB

Заключение. ИИС на базе асинхронного электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента для определения весовых и/или триботехнических характеристик транспортных объектов позволяет вычислить массу и/или коэффициент трения объекта измерения относительно опорной поверхности. Предложенный подход повышает метрологические характеристики измерительной системы, расширяет функциональные характеристики электромеханических преобразователей и повышает надёжность. Использование программируемого вычислительного устройства, сравнивающего измеряемые значения электрических параметров электродвигателя при перемещении объекта измерения с предварительно внесёнными значениями тех же параметров электродвигателя без перемещения объекта измерения и их предельно допустимые значения, обеспечивает точность измерительной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 316 с.
2. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 134 с.
3. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с.
4. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
5. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
6. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объёмного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
7. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
8. Совмещённые электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим [и др.]: под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Kulinchenko, G. V. Research of dynamic parameters of the electric drive on the basis of rolling rotor motor / G. V. Kulinchenko, A. M. Maslennikov, V. A. Baguta // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2016. – № 6. – P. 9-14. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.6.02>.
10. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 36-44. doi: [10.15587/1729-4061.2019.174203](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174203).
11. Garganeev, A. G. Design Principles of Pipeline Valve Mechatronic Systems / A. G. Garganeev, V. V. Mashinsky // XIII International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – 2012. – P. 330-332.
12. Udovichenko, A. V. Electric motors for variable-speed drive of lock valves / A. V. Udovichenko [et al.] // Electronics. – 2021. – Vol. 10, iss. 21, URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/21/2727> (access date: 30.11.2022).
13. Laitwaite, E. R. Linear motors with transverse flux / E. R. Laitwaite // Proc. IEEE. Vol. 118. № 12. – 1971. – P. 1761-1767.
14. Bahke, E. Transport system Heute und Morgen Mainz / E. Bahke // Krausskopf Verlag. – 1973. – 215 p.
15. Rummich, E. Synchroner Linearmaschinen / E. Rummich // Bull. SEV. – № 23. – 1972. – P. 1338-1344.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
17. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 43-47.
18. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.

19. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
20. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
21. Патент № 2736387 Российская Федерация, МПК F16K 31/04 (2006.01), F16K 37/00 (2006.01). Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020: опубликовано 16.11.2020 // Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В. – 9 с.
22. Москвитин, А. И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Электрические молотки, вибраторы, быстроходный электромагнитный привод / А. И. Москвитин. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1950. – 144 с.
23. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
24. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
25. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.