

УДК 621.01

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-45-51

Разработка задатчиков движения для управления роботизированными системами с постоянной точкой ввода инструмента

К.А. Шалюхин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

Design and development of motion generators for controlling the robotic systems with a constant tool insertion point

К.А. Shalyukhin

Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены проблемы разработки задатчиков движения для пространственных механизмов робототехники. Отмечены преимущества и недостатки различных компоновок задатчиков движения с точки зрения управления механизмами с постоянной точкой ввода инструмента. Освещены перспективы развития принципов управления и конструкций задатчиков движения для робот-ассистированной хирургии.

Ключевые слова: задатчик движения, робототехническая система, механизм с постоянной точкой ввода, робот-ассистированная хирургия, скролл-потенциометр, медицинский эндоскоп

The paper considers problems in design and development of motion generators for the robotics spatial mechanisms. Advantages and disadvantages of different arrangements of the motion generators from the point of view of controlling mechanisms with the constant tool insertion point are noted. The prospects for development of the control principles and designs of the motion generators in the robot-assisted surgery are highlighted.

Keywords: motion generator, robotic system, mechanism with constant insertion point, robot-assisted surgery, scroll potentiometer, medical endoscope

В условиях распространения роботизации на различные сферы деятельности человека все более сложные операции и работы доверяют роботам. В агрессивных средах, под водой [1, 2], в космическом пространстве [3], медицине и хирургии [4–7] роботы и манипуляторы становятся незаменимыми помощниками человека.

Наряду с развитием исполнительных механизмов, вступающих в контакт с объектом работы, появляются и новые элементы управления, задатчики движения (ЗД). Эти устройства взаимодействуют с человеком-оператором, который непосредственно управляет движением,

в случае телеманипулятора, или при необходимости вмешивается в процесс, выполняемый робототехнической системой в полувыводом режиме.

Разработка ЗД требует решения вопросов эргономики, удобства использования оператором и логики управления, понятной на интуитивном уровне, надежности, помехоустойчивости и максимально возможной конструктивной простоты ЗД.

Цель работы — оценить конструктивные решения разрабатываемых ЗД с позиции управления механизмом с постоянной точкой ввода.

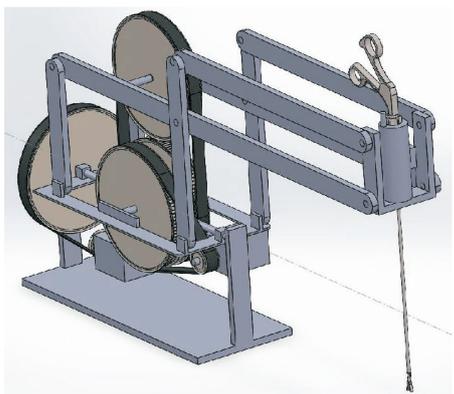


Рис. 1. Механизм с постоянной точкой ввода

Механизмы такого типа применяют, в частности, в технической эндоскопии, решая задачу манипуляций в закрытом объеме, доступ в который ограничен небольшим отверстием. Например, 3Д используют в зондовой диагностике плазмы в камере двигателя [8] или в малоинвазивной хирургии, где контроль за операцией осуществляется с помощью эндоскопа через небольшой прокол в коже пациента [9].

Известны современные робототехнические системы для хирургической лапароскопии. В состав робот-ассистированной хирургической системы da Vinci [10] входит комплекс объемного отображения операционной зоны. Система SoloAssist [11] — самостоятельный робототехнический комплекс, позволяющий оперирующему хирургу управлять стандартным эндоскопом с видеокамерой посредством джойстика, закрепленного на рукоятке рабочего инструмента, или с помощью голосовых команд.

В Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук разработан ряд опытных образцов механизмов, способных решить задачи управления медицинским эндоскопом [12]. Среди них наиболее подходящим для испытания 3Д с разными формами задания управляющего сигнала является манипулятор на базе сбалансированного механизма с постоянной точкой ввода инструмента и четырьмя степенями свободы, приведенный на рис. 1.

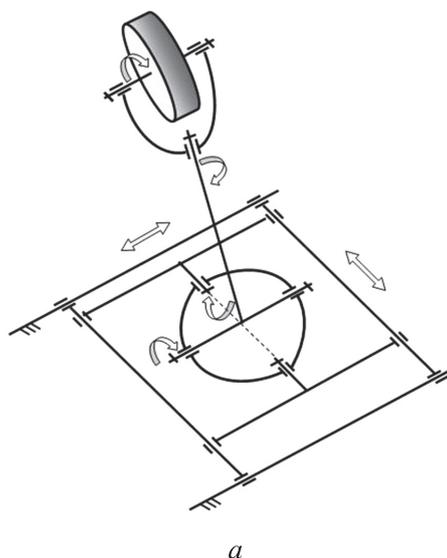
Преимущество этого манипулятора перед аналогичными механизмами заключается в простоте системы управления шаговыми приводами, построенной на базе процессора Arduino Uno, возможности которого позволяют реализовать широкий спектр управляющих программ с применением цифровых или аналоговых 3Д [13]. Для управления таким механиз-

мом использованы 3Д с различными принципами построения.

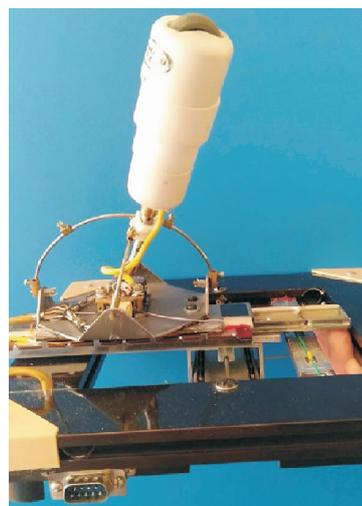
Шестикоординатный 3Д [14], схема которого приведена на рис. 2, а, разработан для управления механизмом с постоянной точкой ввода, имеющим шесть степеней свободы [15].

Такой 3Д выдает аналоговые сигналы управления координатами. Два напряжения управления линейными координатами снимаются с движковых потенциометров SL-10091N-A10K в зависимости от положения каретки, подвижной по двум направлениям в горизонтальной плоскости.

На каретке расположен стандартный двухкоординатный аналоговый джойстик, совмести-



а



б

Рис. 2. Схема (а) и внешний вид прототипа (б) шестикоординатного 3Д

мый с процессором Arduino Uno, который дополнен двумя поворотными резисторами, выдающими два напряжения: по вертикальной линейной координате (по типу скролла) и вращению рукоятки относительно собственной оси.

Внешний вид прототипа шестикоординатного ЗД показан на рис. 2, б. Такой ЗД использовался и для управления четырехкоординатным механизмом, при этом были задействованы три угловых координаты и вертикальное перемещение рабочего органа. Для удобства управления каретка заблокирована в центральной точке.

Недостатки шестикоординатного ЗД заключаются в невысокой стабильности работы, нелинейности и малом размере стандартного джойстика.

Шестикоординатный ЗД с потенциометрами вращения (рис. 3) разработан для следующей модификации того же механизма [15] с целью устранения указанных недостатков.

Он также является аналоговым, но построен полностью на вращательных переменных резисторах. Преобразование двух линейных координат во вращение потенциометров происходит через зубчатые рейки и шестерни, изготовленные методом 3D-печати. Потенциометры наклона ручки соединены с дугами, связанными с ручкой джойстика, угол между осями вращения дуг составляет 90° , а оси параллельны направляющим линейных перемещений.

В центре каретки расположен сферический шарнир, фиксирующий нижний конец джойстика. Джойстик содержит потенциометр, расположенный на оси для измерения угла его по-



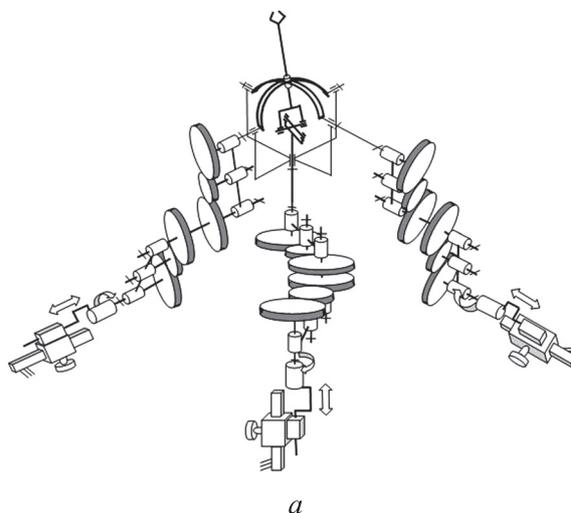
Рис. 3. Внешний вид шестикоординатного ЗД с потенциометрами вращения

ворота вокруг собственной оси, и скролл-потенциометр вертикального перемещения.

Преимущества шестикоординатного ЗД с потенциометрами вращения перед предыдущей конструкцией ЗД заключаются в значительно лучшей линейности и более высокой надежности.

Недостаток шестикоординатного ЗД с потенциометрами вращения состоит в невысокой стабильности работы: при длительной эксплуатации увеличиваются люфты в механизме дуг, что ведет к смещению крайних положений и нулевой точки по углам наклона.

Шестикоординатный ЗД с кинематической развязкой разработан на основе обращенного пространственного механизма с кинематической развязкой [16], являющегося функциональным аналогом дельта-механизма, исполь-



а



б

Рис. 4. Схема (а) и внешний вид прототипа (б) шестикоординатного ЗД с кинематической развязкой

зуемого в контроллерах хирурга [2]. Схема шестикоординатного 3Д с кинематической развязкой приведена на рис. 4, а.

Обращенный характер 3Д с кинематической развязкой заключается в том, что на его выходном звене закреплен джойстик, а шесть приводов, размещенных на основании, заменены датчиками перемещения и угла поворота. Выходное звено с джойстиком имеет шесть степеней свободы, а расположенные на основании датчики выдают значения угловых и линейных перемещений.

Благодаря свойствам кинематической развязки группы угловых и линейных перемещений джойстика независимы между собой, линейные перемещения полностью независимы друг от друга и две угловые координаты также независимы между собой. Они оказывают влияние на третью угловую координату, для которой требуется расчет поправки. Внешний вид прототипа шестикоординатного 3Д с кинематической развязкой показан на рис. 4, б.

Для управления механизмом с постоянной точкой ввода две избыточные линейные координаты зафиксированы, оставшиеся четыре координаты адекватно отражают логику движения рабочего органа.

Недостаток шестикоординатного 3Д с кинематической развязкой, обусловленный технологией изготовления в форме лабораторного макета, заключается в невысокой стабильности работы. Большое число последовательно установленных звеньев в кинематических цепях, связывающих основание с джойстиком, приводит к увеличенным люфтам и, следовательно, к невысокой точности передачи движения угловым и линейным датчикам.

Четырехкоординатный 3Д, повторяющий геометрические характеристики манипулятора (рис. 5), разработан с целью устранения избыточности координат и получения джойстика, максимально сходного с рабочим инструментом хирурга.

Его конструкция повторяет геометрические характеристики манипулятора (взаимное положение и ориентация шарниров и размеры звеньев). Для большей жесткости конструкции в точку ввода помещен сферический шарнир, связанный с основанием. Оператор держит в руке аналог инструмента — диск в середине нижней части (см. рис. 5) и манипулирует им в области, соответствующей операционной зоне

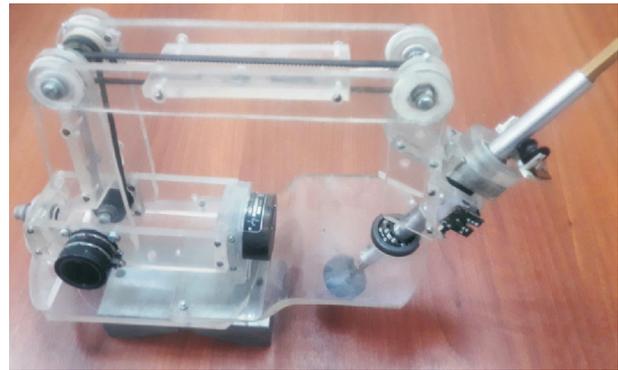


Рис. 5. Внешний вид четырехкоординатного 3Д, повторяющего геометрические характеристики манипулятора

в теле пациента. Углы наклона джойстика измеряют аналоговые потенциометры, а собственное вращение и продольное движение джойстика — энкодеры.

3Д, имитирующий рабочий инструмент (рис. 6), создан для проведения ручных лапароскопических операций без использования манипулятора.

В этой конструкции продольное перемещение выходного звена достигается вертикальным перемещением джойстика, внутри которого установлен движковый потенциометр. Три угловых отклонения джойстика измеряют потенциометры вращения, как и в рассмотренной шестикоординатной конструкции. Дополнительно джойстик снабжен контактом для управления зажимом лапароскопа в виде колец, как на ручном инструменте, благодаря чему достигается естественность движений при управлении механизмом.



Рис. 6. Внешний вид 3Д, имитирующего рабочий инструмент



Рис. 7. Внешний вид педального ЗД (а) и вариант интуитивно понятного управления движением (б)

Недостаток ЗД, имитирующий рабочий инструмент, заключается в нестабильности работы джойстика, что требует частой регулировки механики.

Усовершенствованный ЗД, имитирующий рабочий инструмент, разработан с целью большей надежности на основе модифицированного игрового джойстика. Модификация состояла в увеличении диапазонов трех угловых отклонений и в блокировке системы возврата к точке нулевого отклонения. Для вертикального перемещения использован потенциометр, расположенный на основании джойстика, а интерфейс ЗД приведен к стандартному виду, совместимому с механизмом.

При лапароскопической операции возможна передача роботизированной системе вспомогательных функций, в частности управления эндоскопом, отображающим на внешнем мониторе зону операции. При этом управление может осуществлять хирург, но с учетом того, что обе его руки заняты.

Педальный ЗД изображен на рис. 7, а. Его конструкция основана на четырех педальных выключателях и платформе для оператора, который может работать сидя, расположив ноги на платформе, или стоя непосредственно на ней. Платформа позволяет человеку стоять, не нажимая ни на одну из педалей.

Управление осуществляется одним из восьми сигналов, так как каждая из четырех степеней подвижности имеет по два направления движения. Сигналы формируются в зависимости от количества и сочетания нажатых педалей.

Вариант интуитивно понятного управления приведен на рис. 7, б. Оператор стоит справа от

манипулятора, лицом к нему, рабочий инструмент находится с правой стороны. Красным цветом выделены нажатые педали.

Преимущества педального ЗД перед другими ЗД заключаются в освобождении рук оператора для выполнения других функций, в высокой надежности и возможности регулирования чувствительности педалей для оптимальной эргономичности управления.

Недостаток педального ЗД состоит в невозможности одновременной работы нескольких приводов, так как для четырех педалей существует всего восемь вариантов нажатия (с учетом невозможности нажатия одновременно носком и пяткой одной ноги, т. е. $1 + 2$ и $4 + 3$), для реверсивного управления отдельно каждым из четырех приводов. Кроме того, при управлении стоя, нажатие педалей для управления и поддержание равновесия оператора могут входить в противоречие, что некомфортно и ведет к повышенной утомляемости.

В качестве альтернативы педального ЗД при необходимости освобождения рук оператора разрабатываются варианты управления с помощью двух небольших джойстиков, закрепленных на рукоятках рабочих инструментов хирурга, а также вариант управления камерой посредством небольших поворотов головы.

Выводы

1. Для эффективного управления роботизированными системами с постоянной точкой ввода необходимы ЗД, разработанные под конкретные задачи, решаемые с их помощью.

2. Важнейшими характеристиками ЗД являются надежность, стабильность характеристик и интуитивно понятная логика управления.

3. Необходимо учитывать эргономичность устройств, а также рассматривать новые принципы управления, облегчающие работу оператора, снижающие утомляемость и создающие для него комфортные условия.

Литература

- [1] Глазунов В.А., ред. *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018. 316 с.
- [2] Глазунов В.А., Хейло С.В., ред. *Механизмы перспективных робототехнических систем*. Москва, Техносфера, 2020. 296 с.
- [3] Глазунов В.А., Хейло С.В., ред. *Новые механизмы робототехнических и измерительных систем*. Москва, Техносфера, 2022. 244 с.
- [4] Martínez J.A.G., Cardinale F. Robotics in neurosurgery. *Springer*, 2022. 307 p.
- [5] Diana M., Marescaux J. Robotic surgery. *Br. J. Surg.*, 2015, vol. 102, no. 2, pp. e15-e28, doi: <https://doi.org/10.1002/bjs.9711>
- [6] Zhang X., Lehman A., Nelson C.A. et al. Cooperative robotic assistant for laparoscopic surgery: CoBRASurge. *Proc. IROS'09*, 2009, pp. 5540–5545, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354446>
- [7] Kuo C.-H., Dai J.S., Dasgupta P. Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview. *Int. J. Med. Robot.*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 127–145, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.453>
- [8] Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К. и др. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в зондовой диагностике плазменных потоков. *Лесной вестник*, 2019, т. 23, № 6, с. 92–97, doi: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-6-92-97>
- [9] Essomba T., Nguyen Vu L., Wu C. Optimization of a spherical decoupled mechanism for neuro-endoscopy based on experimental kinematic data. *J. Mech.*, 2020, vol. 36, no. 1, pp. 133–147, doi: <https://doi.org/10.1017/jmech.2019.33>
- [10] Freschi C., Ferrari V., Melfi F. et al. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator. *Int. J. Med. Robot.*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 394–406, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.1468>
- [11] Ohmura Y., Nakagawa M., Suzuki H. et al. Feasibility and usefulness of a joystick-guided robotic scope holder (soloassist) in laparoscopic surgery. *Visc. Med.*, 2018, vol. 34, no. 1, pp. 37–44, doi: <https://doi.org/10.1159/000485524>
- [12] Алешин А.К., Антонов А.В., Глазунов В.А. и др. *Пространственный механизм с шестью степенями свободы*. Патент РФ 182946. Заявл. 06.09.2018, опубл. 22.06.2018.
- [13] Warren J.D., Adams J., Molle H. *Arduino robotics*. Apress, 2011. 628 p.
- [14] Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Левин С.В. и др. *Пространственный механизм с пятью степенями свободы*. Патент РФ 146894. Заявл. 24.06.2014, опубл. 20.10.2014.
- [15] Глазунов В.А., Глушков П.С., Левин С.В. и др. *Манипулятор*. Патент РФ 170656. Заявл. 20.06.2016, опубл. 03.05.2017.
- [16] Рашоян Г.В., Шалюхин К.А., Алешин А.К. Анализ кинематики механизма параллельной структуры со свойствами кинематической развязки. *Вестник научно-технического развития*, 2018, № 1, с. 32–37, doi: <https://doi.org/10.18411/vntr2018-125-4>

References

- [1] Glazunov V.A., ed. *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 316 p. (In Russ.).
- [2] Glazunov V.A., Kheylo S.V., eds. *Mekhanizmy perspektivnykh robototekhnicheskikh sistem* [Mechanisms of perspective robotic systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2020. 296 p. (In Russ.).
- [3] Glazunov V.A., Kheylo S.V., eds. *Novye mekhanizmy robototekhnicheskikh i izmeritelnykh sistem* [New mechanisms of robotic and measuring systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2022. 244 p. (In Russ.).
- [4] Martínez J.A.G., Cardinale F. Robotics in neurosurgery. *Springer*, 2022. 307 p.

- [5] Diana M., Marescaux J. Robotic surgery. *Br. J. Surg.*, 2015, vol. 102, no. 2, pp. e15-e28, doi: <https://doi.org/10.1002/bjs.9711>
- [6] Zhang X., Lehman A., Nelson C.A. et al. Cooperative robotic assistant for laparoscopic surgery: CoBRASurge. *Proc. IROS'09*, 2009, pp. 5540–5545, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354446>
- [7] Kuo C.-H., Dai J.S., Dasgupta P. Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview. *Int. J. Med. Robot.*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 127–145, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.453>
- [8] Filippov G.S., Glazunov V.A., Aleshin A.K. et al. Application prospects of parallel structure mechanisms in probe diagnostics of plasma flows. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 6, pp. 92–97, doi: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-6-92-97> (in Russ.).
- [9] Essomba T., Nguyen Vu L., Wu C. Optimization of a spherical decoupled mechanism for neuro-endoscopy based on experimental kinematic data. *J. Mech.*, 2020, vol. 36, no. 1, pp. 133–147, doi: <https://doi.org/10.1017/jmech.2019.33>
- [10] Freschi C., Ferrari V., Melfi F. et al. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator. *Int. J. Med. Robot.*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 394–406, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.1468>
- [11] Ohmura Y., Nakagawa M., Suzuki H. et al. Feasibility and usefulness of a joystick-guided robotic scope holder (soloassist) in laparoscopic surgery. *Visc. Med.*, 2018, vol. 34, no. 1, pp. 37–44, doi: <https://doi.org/10.1159/000485524>
- [12] Aleshin A.K., Antonov A.V., Glazunov V.A. et al. *Prostranstvennyy mekhanizm s shesty stepenyami svobody* [Spatial mechanism with six degrees of freedom]. Patent RU 182946. Appl. 06.09.2018, publ. 22.06.2018. (In Russ.).
- [13] Warren J.D., Adams J., Molle H. *Arduino robotics*. Apress, 2011. 628 p.
- [14] Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Levin S.V. et al. *Prostranstvennyy mekhanizm s pyaty stepenyami svobody* [Spatial mechanism with five degrees of freedom]. Patent RU 146894 U1. Appl. 24.06.2014, publ. 20.10.2014. (In Russ.).
- [15] Glazunov V.A., Glushkov P.S., Levin S.V. et al. *Manipulyator* [Manipulator]. Patent RU 170656. Appl. 20.06.2016, publ. 03.05.2017. (In Russ.).
- [16] Rashoyan G.V., Shalyukhin K.A., Aleshin A.K. Analysis of kinematics of a parallel structure mechanism with kinematical decoupling properties. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Science and Technical Development], 2018, no. 1, pp. 32–37, doi: <https://doi.org/10.18411/vntr2018-125-4> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.07.2023

Информация об авторе

ШАЛЮХИН Константин Андреевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и управления машинами. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: constmeister@gmail.com).

Information about the author

SHALYUKHIN Konstantin Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: constmeister@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шалюхин К.А. Разработка задатчиков движения для управления роботизированными системами с постоянной точкой ввода инструмента. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 45–51, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-45-51

Please cite this article in English as:

Shalyukhin K.A. Design and development of motion generators for controlling the robotic systems with a constant tool insertion point. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 45–51, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-45-51