

---

---

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

## METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

---

---

УДК 681.2-2,62-293, 53.08, 629.78  
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592

### ИМИТАТОР ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НАНОСПУТНИКОВ СТАНДАРТА CUBESAT 6U

Д. В. Фомин\*, А. Е. Голых

*Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия*

\* *e-office@yandex.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты исследования спроектированного имитатора транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний наноспутников стандарта CubeSat 6U. Частотный анализ устройства проводился в САПР SolidWorks в диапазоне 5–140 Гц; в результате выявлены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости  $Z$  и одна — 42,25 Гц для плоскостей  $X$  и  $Y$ . Приведены результаты натурных испытаний спроектированного устройства по поиску резонансов путем измерения амплитуд и частот. Установлено, что на всем диапазоне сдвиг частот не превысил 5 %, а наибольший сдвиг амплитуды составил 18 % на частоте 40,2 Гц в плоскости  $Y$ . Полученные значения свидетельствуют, что спроектированное устройство может использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях спутников. Расхождение значений резонансных частот, полученных при натурных и модельных испытаниях, не превысило 5 %, что удовлетворяет стандартным требованиям сходимости результатов измерений.

*Ключевые слова:* оснастка, собственные частоты, масса нагрузки вибростенда, наноспутник, вибродинамические испытания, деформация

**Ссылка для цитирования:** Фомин Д. В., Голых А. Е. Имитатор транспортно-пускового контейнера для вибродинамических испытаний наноспутников стандарта CubeSat 6U // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 586–592. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592.

### SIMULATOR OF A TRANSPORT AND LAUNCH CONTAINER FOR VIBRODYNAMIC TESTS OF CUBESAT 6U STANDARD NANOSATELLITES

D. V. Fomin\*, A. E. Golykh

*Amur State University, Blagoveshchensk, Russia*

\* *e-office@yandex.ru*

**Annotation.** Results of a study of a simulator of a transport and launch container designed for conducting vibration-dynamic tests of CubeSat 6U standard nanosatellites are presented. The frequency analysis of the device is carried out in CAD SolidWorks in the range from 5 to 140 Hz. As a result, two resonant frequencies of 42.25; 75.42 Hz in the  $Z$  plane and one — 42.25 Hz, for the  $X$  and  $Y$  planes, are identified. Results of full-scale tests of the designed device for searching resonances by measuring amplitudes and frequencies are presented. It is found that the frequency shift did not exceed 5% over the entire range, and the greatest amplitude shift is 18% at the frequency of 40.2 Hz in the  $Y$  plane. The obtained values indicate that the designed device can be used as equipment for vibration-dynamic tests of satellites. The discrepancy between the values of resonance frequencies obtained during full-scale and model tests did not exceed 5%, which satisfies the standard requirements for the convergence of measures.

*Keywords:* tooling, natural frequencies, vibration stand load mass, nanosatellite, vibrodynamic tests, deformation

**For citation:** Fomin D. V., Golykh A. E. Simulator of a transport and launch container for vibrodynamic tests of CubeSat 6U standard nanosatellites. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 586–592 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592.

В современной промышленности вибродинамическое тестирование (ВДИ) сложных технических устройств является неотъемлемой частью процесса контроля и обеспечения качества данных изделий и их функциональных блоков, поскольку при эксплуатации вибрации могут оказывать на них разрушительное воздействие, вызывая износ изделий, поломки или снижение работоспособности. Чтобы гарантировать безопасность и надежность спроектированных конструкций, важно проводить тщательное тестирование на вибрационную нагрузку как отдельных узлов, так и всего устройства в сборе.

Одним из ключевых элементов при проведении такого тестирования являются специальные оснастки, предназначенные для закрепления объектов исследования на столе вибростенда. Эти конструкции должны не только обеспечивать фиксацию объектов, но и сохранять свои механические свойства неизменными под воздействием интенсивных вибрационных нагрузок.

В настоящей статье рассматривается спроектированная в Научно-образовательном центре (НОЦ) им. К. Э. Циолковского Амурского государственного университета (АмГУ) оснастка для малых космических аппаратов (МКА) стандарта CubeSat, используемая при проведении вибродинамических испытаний [1, 2]. Закрепление наноспутников на столе вибростенда осуществляется с помощью специальной оснастки. Для этого, как правило, используют имитаторы транспортно-пусковых контейнеров (ИТПК), которые представляют собой рамные конструкции, имитирующие воздействие реального пускового контейнера на спутник. На данный момент существует несколько типов ИТПК, которые можно разделить на закрепляемые на столе вибростенда и закрепляемые на поворотные основания. Устройства первого типа применяются на вибростендах, создающих вибрацию в трех взаимно ортогональных плоскостях. Такие ИТПК можно использовать и на однонаправленных вибростендах, однако для обеспечения воздействия вибрации на тестируемый спутник в других ортогональных плоскостях необходимо его извлекать из контейнера и поворачивать вручную, причем только на возможные углы 90, 180 и 270°, а затем возвращать обратно в контейнер, прерывая при этом процесс ВДИ. В качестве примера закрепляемых на столе вибростенда ИТПК можно рассмотреть представленные в патентах RU 2758161 C1 и RU 211274 U1. В данных устройствах возможен поворот спутников (в ручном режиме) при тестировании МКА стандарта CubeSat 1U — 3U и 12U, при тестировании спутников стандарта CubeSat 6U в рассматриваемых устройствах — поворот только на угол 180°. Таким образом, тестирование спутников на однокомпонентных вибростендах с применением ИТПК, закрепляемых на столе вибростенда, требует дополнительных временных затрат, при этом поворот МКА внутри ИТПК возможен только вокруг продольной оси на фиксированные углы, а тестирование можно провести только в двух плоскостях [1–3].

Для устранения указанных недостатков следует использовать ИТПК, закрепляемые на поворотных основаниях, которые, в свою очередь, закрепляются на столах однокомпонентных вибростендов. Благодаря этому изменение ориентации наноспутника происходит в трех ортогональных плоскостях относительно стола вибростенда непосредственно на поворотном основании. Данные оснастки сокращают время проведения испытаний, что соответствует ГОСТ 30630.0.0-99, п. 6.9\*.

Таким образом, согласно представленному анализу способов использования ИТПК в составе вибростендов с однонаправленным вибрационным воздействием наибольший интерес представляют последние. Поэтому далее рассмотрим пример реализации конструкций ИТПК, закрепляемых на поворотных основаниях, — одна из них, предназначенная для спутников стандарта CubeSat 1U-3U, представлена на рис. 1 [4].

Спроектированное и изготовленное устройство представляет собой ИТПК с системой балансировки центра масс и полуосями для установки на поворотное основание [4]. Данное устройство прошло апробацию на однокомпонентном вибростенде ВИКАМ 35/14, создающем синусоидальную вибрацию в вертикальной плоскости с перемещением стола до 3 мм (без

\* ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. Введ. 01.09.2000.



Рис. 1

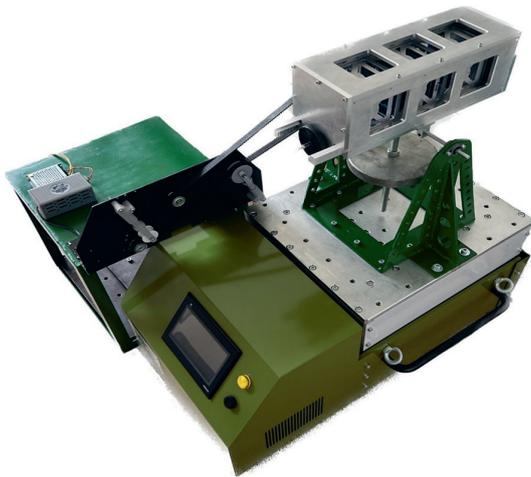


Рис. 2

нагрузки). Максимальная масса нагружения вибростенда составляет 35 кг. К достоинствам данного прибора можно отнести его низкую стоимость и относительную простоту использования [5]. В процессе тестирования наноспутника на вибростенде с применением вышеописанной оснастки поворот ИТПК происходит благодаря наличию полуосей, размещенных под его основанием (оси закрепляются в подшипниках), а крутящий момент передается от шагового двигателя через зубчато-ременную передачу системой натяжителей-успокоителей (рис. 2). Управление самим двигателем осуществляется с помощью микроконтроллера с использованием специально программного обеспечения [2].

Масса рассматриваемого ИТПК вместе с максимально возможной массой спутника стандарта CubeSat 3U (4 кг) составляет 11,44 кг [2]. Масса поворотного основания 4,45 кг, а масса балансиров 5,5 кг. В результате общая масса оснастки со спутником составляет 21,39 кг. Важно отметить, что данное значение находится, согласно паспортным данным вибростенда, в пределах допустимого нагружения для ВИКАМ 35/14, поскольку бесконтрольное увеличение массы исследуемого объекта ведет к снижению значений максимального ускорения вибростола. Таким образом, представленная оснастка позволяет тестировать на указанном оборудовании спутники с массой КА, не превышающей 4 кг, поскольку масса самой оснастки составляет 17,39 кг.

Цель данной работы — проектирование закрепляемого на поворотном основании ИТПК для более тяжелых наноспутников массой до 12 кг (стандарт CubeSat 6U) в отношении однокомпонентного вибростенда ВИКАМ 35/14, исследования по определению резонансных частот и коэффициентов массового уча-

стия спроектированного устройства путем моделирования в САПР SolidWorks, также проведение вибродинамических натурных испытаний спроектированного и изготовленного ИТПК 6U.

При проектировании необходимо было учесть, что суммарная масса нагрузки не должна превышать  $2/3$  от максимально возможной массы нагружения рассматриваемого вибростенда (35 кг), так как при превышении этого предела вибростенд не сможет развивать нужное виброускорение. Исходя из вышесказанного при использовании спутника стандарта CubeSat 6U (с максимальной массой 12 кг) требовалось перепроектировать ИТПК (представленный на рис. 1) под ранее разработанное поворотное основание таким образом, чтобы снизить общую массу оснастки, например, путем размещения оси ее вращения в геометрическом центре боковых поверхностей ИТПК с целью исключения ранее использовавшихся массивных балансиров. Также необходимо было дополнить конструкцию ИТПК механизмом точной фиксации положения спутника ввиду изменения принципа балансировки.

Важно отметить, что при проведении натурных виброиспытаний изготовленного ИТПК с целью поиска резонансных частот были учтены критерии и методы, установленные документом Европейского сотрудничества по космической стандартизации наземных испытаний космических аппаратов — стандартом ECSS-E-ST-10-03C, п. 5.5.2.5.

Для вибростенда ВИКАМ 35/14 с максимальной нагрузкой 35 кг в САПР SolidWorks был спроектирован ИТПК для спутников стандарта CubeSat 6U с массой 8,4 кг, закрепляемый на поворотном основании (рис. 3).

ИТПК содержит: съемный механизм синхронизации 1 (см. рис. 4), благодаря которому происходит равномерный зажим спутника ножничными подъемниками 2, обеспечивающими фиксацию и расфиксацию спутника внутри ИТПК; боковые стенки, в геометрических центрах которых расположены фланцы для установки осей вращения 3 — такая конфигурация боковых стенок позволяет исключить массивные балансиры, применявшиеся в предыдущей конструкции (см. рис. 1);двигающуюся каретку 4, которая в спроектированной конструкции используется для балансировки спутника, и, помимо этого, позволяет реализовать функцию безопасной установки и извлечения спутника в/из ИТПК.

Спроектированное устройство поддерживает следующий функционал предыдущей разработки с поворотным основанием: возможность поворота на любой угол в плоскости  $Y$  и надежную фиксацию спутника внутри ИТПК. При этом модернизированное устройство позволяет осуществить балансировку спутника внутри контейнера благодаря наличию двигающейся каретки, после чего зафиксировать его с помощью ножничных подъемников и съемного устройства синхронизации.

Анализ массовых характеристик спроектированного устройства показал, что результирующее значение для ИТПК с основанием и спутником внутри составило 20,4 кг. Данная величина получена путем суммирования масс: поворотного основания (4,45 кг), ИТПК (3,95 кг) и максимальной массы спутника стандарта CubeSat 6U (12 кг). Общая рассчитанная масса не превышает максимального нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14 (23,33 кг), что позволяет провести натурные вибродинамические испытания для спутника стандарта CubeSat 6U и спутников меньшей массы [6].

Масса спроектированной оснастки для спутников CubeSat 6U благодаря изменениям ее конструкции стала меньше на 4,85 % по сравнению с ИТПК для спутников CubeSat 1U — 3U (см. рис. 1).

После оценки массовых характеристик спроектированного устройства было проведено модельное исследование по определению его собственных частот с малым воздействием 1g [7] в программе САПР SolidWorks. Предел для исследования был выбран исходя из значений частот, возникающих при наземной транспортировке (от 5 до 140 Гц согласно ECSS-E-ST-10-03C). В результате исследования были определены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости  $Z$  и одна резонансная частота 42,25 Гц для плоскостей  $X$  и  $Y$ . Графическая зависимость частоты ( $f$ ) от действительного коэффициента массового участия ( $K$ ), полученная в ходе модельных испытаний, представлена на рис. 5 (значения для других частот на графике не показаны, поскольку для них не было обнаружено значительных резонансов).

При моделировании для анализа качества примененной сетки использовался коэффициент Якобиана, при этом для наиболее искаженного элемента сетки он составил 6,95, что говорит о ее высоком качестве (в соответствии с руководством SolidWorks [8]). В результате локализации наибольшая деформация при вибрации была определена в зоне фиксации полуосей на боковых стенках ИТПК. Вид распределения деформаций по ИТПК для спутников стандарта CubeSat 6U показан на рис. 6.

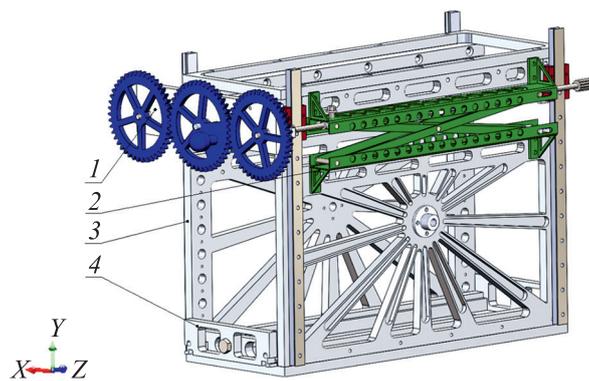


Рис. 3



Рис. 4

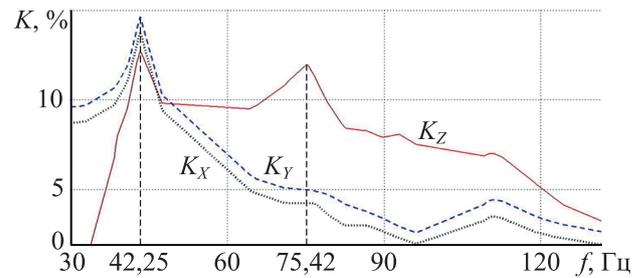


Рис. 5

После моделирования в программе САПР SolidWorks для спроектированного ИТПК с определенными собственными частотами и наиболее деформируемыми областями был изготовлен экспериментальный образец устройства (патент на изобретение № 2812511 от 30.01.2024), который затем прошел натурные испытания. Материалом его основания, стенок и крышки стал алюминий марки АМг2М. Направляющие и фланцы полуосей были распечатаны на 3D-принтере из ABS пластика с заполнением 75 % (материалы изготовленного образца соответствовали модельным). Масса изготовленного образца в сборе составила 20,5 кг. Фото экспериментального образца ИТПК представлено на рис. 7.



Рис. 6

Экспериментальный образец был протестирован на наличие собственных частот на вибростенде ВИКАМ 35/14. Значение спектральной плотности ускорения соответствовало максимальному, возникающему при наземной транспортировке, и составило  $0,02 \text{ г}^2/\text{Гц}$ . Значение амплитуды при такой спектральной плотности ускорения —  $0,180 \text{ мм}$ . Регистрирующий датчик закреплялся в наиболее деформируемых областях, определенных ранее при модельных испытаниях (рис. 8). Чтобы получить данные других ортогональных плоскостей, испытания на короткое время приостанавливались и выполнялась смена ориентации датчика. Управляющая точка крепления датчика была выбрана в соответствии с ГОСТ 28203-89, п. 3.3.

В ходе испытаний для каждой ортогональной оси ИТПК были получены два массива данных. На первом этапе (до) и на втором (после, спустя некоторое время) осуществлялся поиск резонансов в конструкции. В результате сравнения полученных амплитуд и частот установлено, что на всем диапазоне сдвиг частот не превысил 5 %, а наибольший сдвиг амплитуды составил 18 % на частоте 40,2 Гц в плоскости  $Y$ . Полученные значения в соответствии со стандартом ECSS-E-ST-10-03C, п. 5.5.2.5, свидетельствуют, что спроектированное устройство может



Рис. 7



Рис. 8

использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях наноспутников. Расхождение значений резонансных частот, полученных при натурных и модельных испытаниях, не превысило 5 %, что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002, п. 3.16.

**Вывод.** Изменения, внесенные в конструкцию ранее разработанного ИТПК, привели к снижению его массы на 4,85 %. При этом модернизированное устройство позволяет тестировать спутники стандарта CubeSat 6U, максимальная масса которых на 33,33 % больше максимальной массы спутников CubeSat 3U. Полученная суммарная масса 20,4 кг не превышает максимального нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14.

Результаты модельного исследования и натурных испытаний демонстрируют, что спроектированное устройство может использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях спутников стандарта CubeSat 6U.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин Д. В., Струков Д. О., Герман А. С. Универсальная платформа полезной нагрузки для малых спутников стандарта CubeSat // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 446–449. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449.
2. Голых А. Е., Фомин Д. В. Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 472–482. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482.
3. Heidt H. et al. CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry LowCost Space Experimentation // 14th Annual/USU Conf. on Small Satellites, Logan, Utah, Aug. 21–24, 2000.
4. Пат. 2796176 С1 РФ, МПК В64G 7/00. Поворотное устройство имитатора транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U / Д. В. Фомин, А. Е. Голых. Заявл. 27.12.2022. Оpubл. 17.05.2023.
5. Электромеханический вибрационный стенд ВИКАМ-35/14 [Электронный ресурс]: <https://technoprism.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatelnogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35>, 09.10.2023.
6. Спецификация спутников стандарта CubeSat 1U-12. CubeSat Design Specification Rev. 14.1 The CubeSat Program, Cal Poly SLO [Электронный ресурс]: [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14\\_1+2022-02-09.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf), 09.10.2023.
7. Космический аппарат „Маяк“. Программа и методика испытаний на статическую гидродинамическую прочность [Электронный ресурс]: <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/%D0%BC%D0%B0%D1%8F%D0%BA-%D0%B2%D0%B4%D0%B8-%D0%BF%D0%BC-1-%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82.pdf>, 09.02.2024.
8. SolidWorks, разд. Simulation (справка). [Электронный ресурс]: [help.solidworks.com](https://help.solidworks.com), 14.11.2023.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Дмитрий Владимирович Фомин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Амурский государственный университет, научно-образовательный центр им. К. Э. Циолковского; директор; E-mail: e-office@yandex.ru
- Артём Евгеньевич Голых** — магистрант, Амурский государственный университет; лаборатория малых космических аппаратов научно-образовательного центра им. К. Э. Циолковского; инженер; E-mail: toksikccc@gmail.com

Поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 16.05.2024.

## REFERENCES

1. Fomin D.V., Strukov D.O., German A.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 446–449, DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449. (in Russ.)
2. Golykh A.E., Fomin D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 472–482, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482. (in Russ.)
3. Heidt H. et al. *14 Annual/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, 14, August 21–24, 2000. SSC00V5.
4. Pat. RU 2796176C1, *Povorotnoye ustroystvo imitatora transportno-puskovogo konteynera sputnika CubeSat 1-3U* (Rotary Device of Cubesat 1-3u Satellite Transport and Launch Container Simulator), D.V. Fomin, A.E. Golykh, Patent application no. 2022134380, Priority 27.12.2022, Published 17.05.2023, Bulletin 14. (in Russ.)
5. <https://technoprist.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatelnogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35/>. (in Russ.)
6. [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14\\_1+2022-02-09.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf). (in Russ.)
7. <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/%D0%BC%D0%B0%D1%8F%D0%BA-%D0%B2%D0%B4%D0%B8-%D0%BF%D0%BC-1-%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82.pdf>. (in Russ.)
8. help.solidworks.com. (in Russ.)

## DATA ON AUTHORS

- Dmitry V. Fomin** — PhD, Associate Professor; Amur State University, K. E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center; Director; E-mail: e-office@yandex.ru
- Artem E. Golykh** — Graduate Student; Amur State University, K. E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center, Laboratory of Small Spacecrafts; Engineer; E-mail: toksikccc@gmail.com

Received 12.10.2023; approved after reviewing 16.02.2024; accepted for publication 16.05.2024