

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1>

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Научная статья

Кузнецов П.С.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-5459-7883;¹ Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kuziapavel[at]mail.ru)

Аннотация

Данная работа посвящена анализу параметров исполнительных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием (УБМВ) и их влиянию друг на друга. Любое исполнительное устройство представляет из себя совокупность противоречий, т.е. изменение одного эксплуатационного параметра, приводит к изменению других, связанных с ним. Среди рассмотренных параметров: быстродействие, виброустойчивость, точность, привносимая дефектность, газовыделение. Параметры работоспособности исполнительных устройств на основе УБМВ и его элементов оказывают существенное влияние на показатели технологического оборудования – процент выхода годных и фактическую производительность. Результаты исследований конкретного УБМВ позволяют получить зависимости параметров частного характера, которые могут быть положены в основу методических рекомендаций по выбору УБМВ для исполнительных устройств, но с обязательным внесением конкретных уточняющих коэффициентов и строгого определения условий применения.

Ключевые слова: исполнительные устройства, бесконтактное магнитное взаимодействие, вакуумная технологическая среда, выход годных изделий, производительность.

ANALYSIS OF PARAMETERS OF HIGH-TECH EQUIPMENT ACTUATING DEVICES

Research article

Kuznetsov P.S.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-5459-7883;¹ State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (kuziapavel[at]mail.ru)

Abstract

This work is dedicated to the analysis of parameters of actuating devices with contactless magnetic coupling (CMC) and their influence on each other. Any actuating device is a set of contradictions, i.e. change of one operational parameter leads to change of other parameters related to it. Among the examined parameters are the following: quickness, vibration controllability, accuracy, introduced defectiveness, gas emission. Parameters of operability of executive devices on the basis of CMC and its elements have a significant impact on the indicators of technological equipment – the percentage of yield ratio and actual productivity. The results of studies of a particular CMC allow obtaining dependences of parameters of private character, which can be used as a basis for methodical recommendations on selection of CMC for actuating devices, but with obligatory introduction of specific qualifying coefficients and strict definition of application conditions.

Keywords: actuating devices, contactless magnetic coupling, vacuum processing medium, yield ratio, performance.

Введение

Процесс выполнения заданных функций исполнительным устройством (ИУ), обрабатываемый его исполнительными модулями в соответствии с типом ИУ и программой его работы может быть представлен в виде следующих схем (рис.1 и рис.2).

На рис.1 показана схема процесса выполнения заданных функций транспортно-сборочным промышленным ИУ, а на рис. 2 – технологическим.

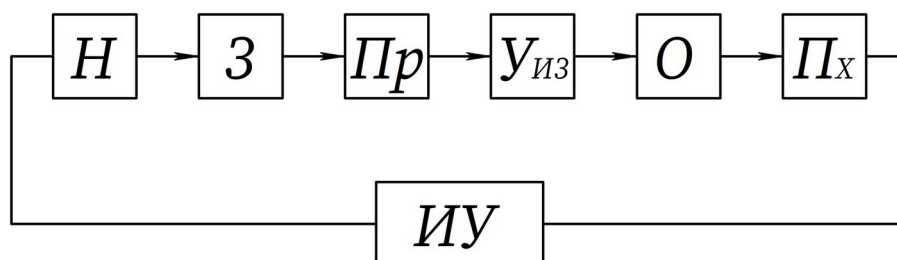


Рисунок 1 - Схема процесса выполнения заданных функций транспортно-сборочным исполнительным устройством
DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.1>

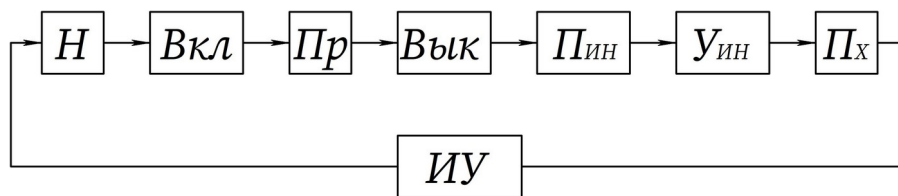


Рисунок 2 - Схема процесса выполнения заданных функций технологическим исполнительным устройством
DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.2>

На рис.1 символами Н, З, ПР, УИЗ, ОИЗ, ПХ обозначены соответственно этапы нахождения, загрузки, перемещения (рабочий ход), установки и освобождения изделия, а также этап перемещения в холостом режиме.

На рис.2 символами Н, Вкл, Пр, Вык, ПИН, УИН, ПХ обозначены соответственно этапы нахождения объекта, включения технологического инструмента, его перемещения в рабочем режиме, включение, перемещение, связанное с установкой инструмента, непосредственно установка инструмента и перемещение ИУ в холостом режиме.

Каждый из рассмотренных этапов выполняется одним или группой исполнительных устройств, которые должны обладать определенными эксплуатационными показателями. Они закладываются уже на стадии проектирования.

Любое исполнительное устройство представляет из себя совокупность противоречий, т.е. изменение одного эксплуатационного параметра, приводит к изменению других, связанных с ним. Это относится к эксплуатационным параметрам исполнительных устройств характеризующим быстродействие (Б), виброустойчивость (В), точность (Т), привносимая дефектность (Д), газовыделение (Г), мобильность (М), приёмистость (П), себестоимость (С), срок окупаемости (О), напряженность электрического поля (Н), теплоустойчивость (У). Взаимосвязь основных параметров исполнительных устройств представлены на рис.3.

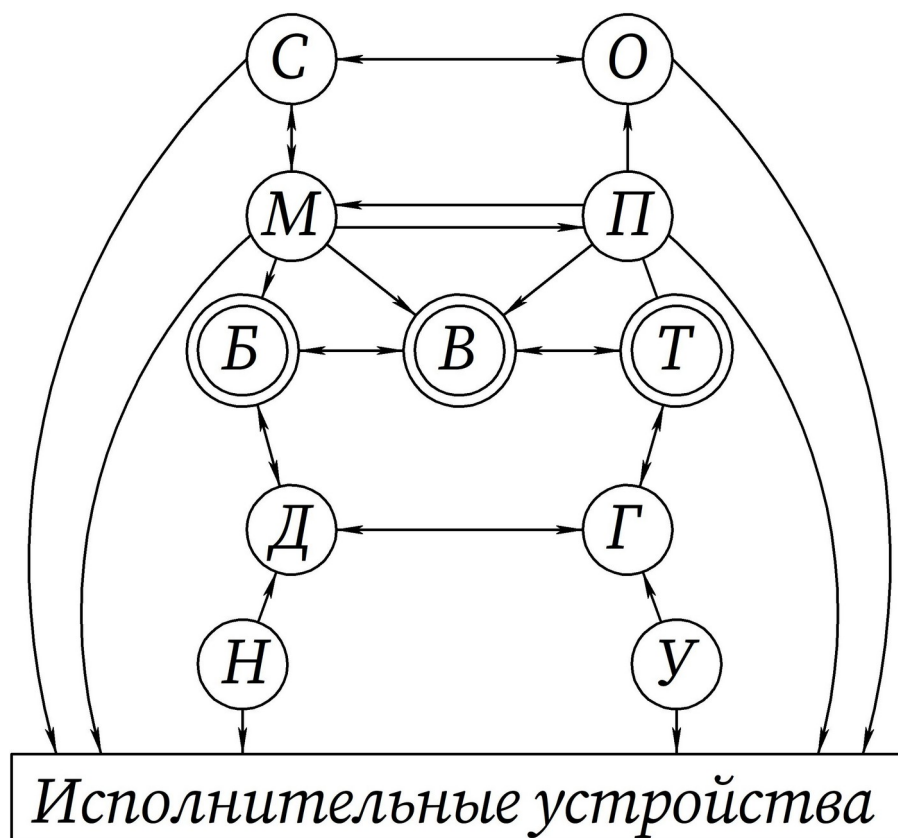


Рисунок 3 - Структурная схема взаимосвязи основных параметров исполнительных устройств
DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.3>

Каждый из перечисленных параметров может быть предметом самостоятельного обсуждения.

В данной работе они объединены требованиями причинно-следственной связи и системного подхода к созданию работоспособных ИУ на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Рассмотрим отдельно каждый из этих параметров, с учетом того, что оптимальное исполнительное устройство соответствует всей совокупности оптимальных параметров, указанных выше.

Быстродействие

Исполнительное устройство должно иметь определенное, оптимальное для заданного технологического процесса время перемещения, увеличение или уменьшение которого приводит к нарушению технологического процесса производства.

Быстродействие исполнительных устройств на основе УБМВ является одним из важнейших показателей, определяющих эффективность применения ИУ в целом. Одним из требований при разработке установок рентгенолитографии является вращение мишени со скоростью 6000...10000 оборотов в минуту [1]. Для ввода вращательного движения в технологическую камеру используются УБМВ. Для установления зависимостей, определяющих конкретные значения величин быстродействия УБМВ для конкретных кинематических схем необходимо провести экспериментально-теоретические исследования. В результате этих исследований получаются зависимости, носящие частный характер. Эти зависимости могут быть положены в основу методических рекомендаций [2], [3], [4], [5] по выбору УБМВ для исполнительных устройств, но с обязательным внесением конкретных уточняющих коэффициентов и строгого определения условий применения.

Проблема работоспособности исполнительных устройств по параметру быстродействия рассмотрена как в отечественной, так и в зарубежной литературе применительно к различным видам ИУ [6], [7], [8], [9].

Виброустойчивость

За счет податливости механических звеньев исполнительных устройств, в них возникают колебания определенной частоты – амплитуды, которые желательно устранять или свести до минимума за счет использования новых материалов, кинематических схем и устройств гашения колебаний. Параметры виброустойчивости непосредственно связаны с быстродействием исполнительного устройства. Чем быстрее «срабатывает» модуль, тем большие амплитуды колебаний возникают в нем. Виброустойчивость ИУ можно назвать также и динамической точностью устройства. Для уменьшения амплитуды собственных колебаний ИУ используют различные гасители или увеличивают жесткость его звеньев. Однако последний путь приводит к повышению веса и габаритов конструкции ИУ в целом, что крайне нежелательно. Нежелательным также является режим работы ИУ с определенными законами разгона и торможения с целью снижения инерционных сил. Это, во-первых, приводит к усложнению системы управления, а во-вторых снижает быстродействие ИУ.

Анализ работ [9], [11], [13], [14], посвященных задаче уменьшения собственных колебаний различных механических систем, показывает, что наиболее перспективным путем является разработка различных систем гашения колебаний. Этот способ обладает широкими возможностями настройки и регулирования параметров, что делает его эффективным в широком диапазоне частот колебаний [15]. На рис.4 представлен виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования.

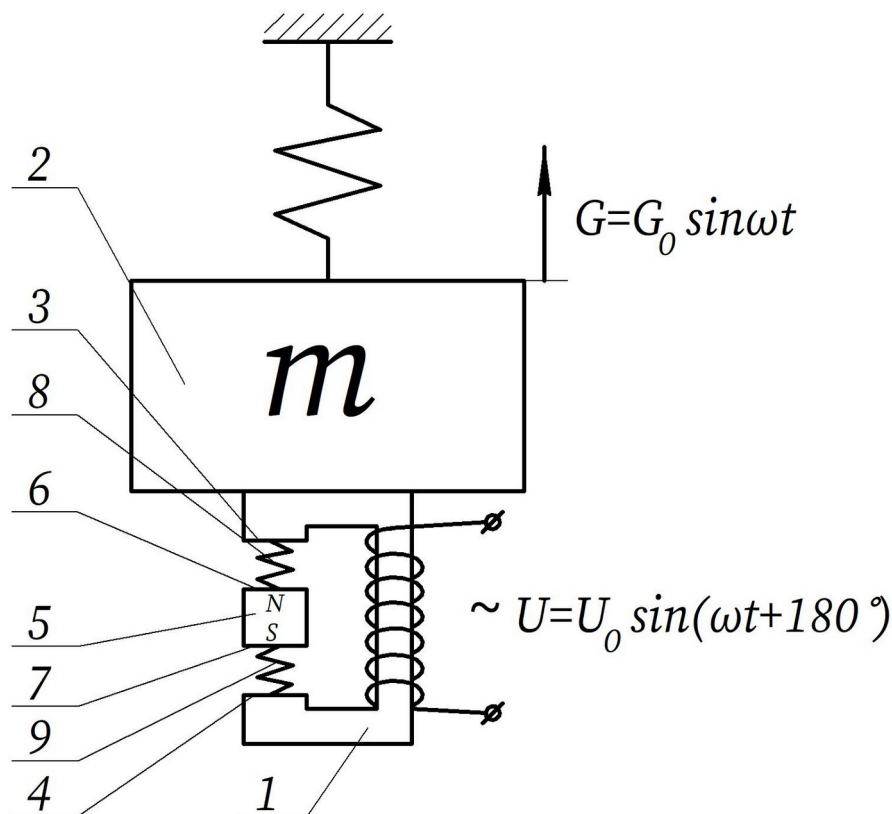


Рисунок 4 - Виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования:

1 – электромагнит; 2 – демпфируемый объект; 3, 4 – полюсы электромагнита; 5 – постоянный магнит; 6, 7 – полюсы постоянного магнита; 8, 9 – пружины сжатия

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.4>

Задача гашения упругих колебаний исполнительных устройств решается как задача введения в колебательные системы дополнительных связей. В зависимости от их вида различают динамическое гашение, когда на исполнительное устройство устанавливаются дополнительные массы, и силовое гашение, при котором точки приложения компенсирующих воздействий совпадают с точками приложения движущих сил приводов.

Изменение вибрационного состояния объекта при присоединении динамического гасителя может осуществляться, как путем перераспределения колебательной энергии от объекта к гасителю, так и в направлении увеличения рассеяния энергии колебаний.

Поскольку ИУ имеет распределенную массу, то полное подавление его колебаний с помощью динамического гасителя невозможно. Поэтому установку гасителей колебаний необходимо производить в наиболее важных точках ИУ. Такими точками, как правило, являются конечные точки звеньев, определяющих точность позиционирования схвата робота.

Другой способ гашения колебаний заключается в использовании специальных полимерных материалов.

Этот способ виброзащиты ИУ является наиболее простым и дешевым, если применять материалы с высокоэффективным демпфированием. Полимерные материалы обносятся к вязкоупругим, занимающим промежуточное положение между твердыми телами и жидкостями, обладающими в различных пропорциях свойствами упругости и вязкости.

Точность

Любое устройство должно иметь определенную точность, которая закладывается при его проектировании, и зависит от точности изготовления механических элементов, входящих в него, а также от податливости механических звеньев. Точность непосредственно связана с виброустойчивостью, так как то и другое зависит от податливости звеньев.

Общий подход к оценке погрешностей исполнительных устройств производится на основе теории точности академика Н.Г. Бруевича. Разработанные им методы расчета позволяют находить ошибки положения и перемещения ведомых звеньев в зависимости от первичных ошибок звеньев исполнительного устройства и функции координат ведущих звеньев [16], [17]. Теория Н.Г. Бруевича рассматривает ошибки выходного параметра $\Delta\varphi$ устройств, как функцию параметров и координат его входных параметров, т.е.

$$\Delta\varphi = (\varphi'_0 - \varphi_0) + \sum_1^S \left(\frac{d\varphi}{dq_s} \right) \Delta q_s + t \sum_1^S \left(\frac{d\varphi}{dq_s} \right) \gamma \quad (1)$$

где $\varphi'_0 - \varphi_0$ – разница между выходными параметрами идеального и реального устройств;

Δq_s – первичная ошибка отдельных звеньев;

γ – скорость изменения начальных погрешностей;

S – число учитываемых первичных ошибок звеньев исполнительного органа.

Для определения погрешностей ИУ существуют различные методы: метод плеча и линии действия, дифференциальный метод, метод преобразованного механизма, геометрический метод, метод относительных погрешностей [18], [19], [20], [21].

Все эти методы определения погрешностей нашли применение в пределах линейной теории точности.

Погрешность позиционирования ИУ в общем случае может быть представлена как сумма кинематической и динамической погрешности. Рассмотрим каждую из составляющих погрешностей отдельно (рис.5). Кинематическая погрешность в течение длительного периода времени может оставаться практически постоянной величиной. Длительность периода наблюдения составляет до двух порядков от длительности переходных процессов в ИУ.

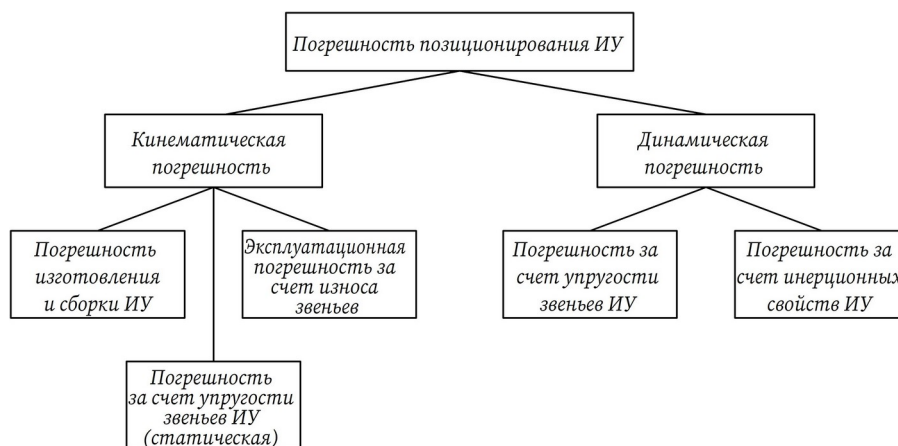


Рисунок 5 - Классификация погрешностей позиционирования исполнительного устройства

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.5>

Динамическая погрешность ИУ состоит из двух основных составляющих – это погрешность за счет инерционности и упругости звеньев. Динамическая погрешность в ИУ возникает в том случае, когда он совершает неравномерное движение и существует в течение малого промежутка времени, равного времени переходных процессов в элементах конструкции.

Соотношение между кинематической Δ_K и Δ_D погрешностями ИУ показаны на рис. 6.

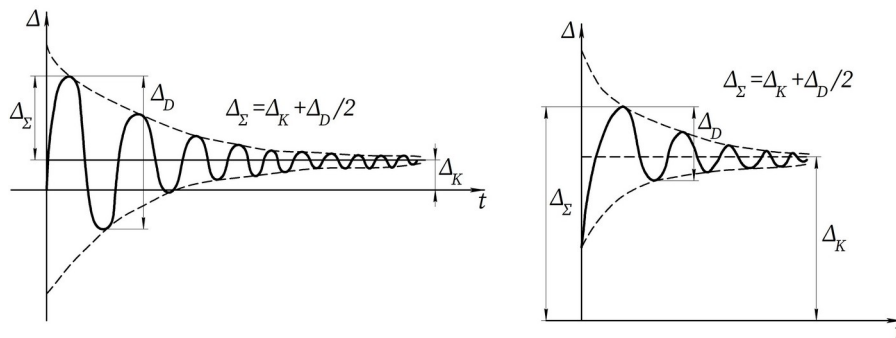


Рисунок 6 - Соотношения между кинематической и динамической погрешностью ИУ
DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.5.1.6>

В исполнительных устройствах, как правило, $\Delta_K > \Delta_D$, что требует определения амплитуд и частот собственных колебаний ИУ.

При решении вопроса о точности позиционирования УБМВ, то есть устройства с нежесткой магнитной связью, целесообразно использовать принцип оптимального автоматического управления, независящего от интенсивности случайных воздействий на систему [22].

Привносимая дефектность

Данный параметр исполнительного устройства наибольший интерес представляет для тех ИУ, работа которых происходит в вакууме. Причина этого заключается в том, что вопросы трибоники достаточно хорошо изучены при нормальных условиях, однако при использовании исполнительных устройств в вакууме сразу же возникает вопрос смазки, а также исключение адгезионного и когезионного взаимодействия трущихся частей и элементов конструкции. Здесь достаточно «пробелов» и «белых пятен», требующих проведения специальных научных исследований. Одним из возможных способов передачи движения в вакуум является использование УБМВ. В устройствах данного типа количество узлов трения сведено к минимуму. Также следует отметить, что микрочастицы, образующиеся в результате трения контактирующих поверхностей материалов (в том числе и немагнитных) обладают определенными магнитными свойствами. Данная особенность позволяет их локализовывать в УБМВ, тем самым обеспечивается снижение привносимой дефектности в вакуумную технологическую среду [2], [23], [24], [25].

Газовыделение

Наличие в вакууме дополнительных газовых потоков из узлов трения приводит к дестабилизации системы «ИУ-вакуумная среда», что оказывает влияние на технологические операции в вакууме. Газовыделение из пар трения ИУ зависит от быстродействия исполнительных устройств в вакууме; чем больше скорость перемещения элементов ИУ, тем больше газовый поток.

Улучшение параметров ИУ по каждому из этих показателей в отдельности не приводит к созданию работоспособных вводов движения в вакуум. Так, для повышения быстродействия уменьшают массы подвижных частей, например, используя в качестве исполнительных устройств трубчатые упругодеформируемые элементы [23]. Это приводит к снижению виброустойчивости, а следовательно, и точности позиционирования.

Точность изготовления деталей ИУ оказывает влияние на трение контактирующих поверхностей за счет возникновения дополнительных динамических нагрузок. От условий трения зависит интенсивность изнашивания и газовый поток из зоны трения. Сложность процесса взаимосвязи параметров ИУ выражается в том, что они оказывают взаимное влияние друг на друга как в прямом, так и в обратном направлении (рис. 3).

Так, например, наличие колебательного процесса в системе, приводит к повышению пути трения, что сказывается на интенсивности изнашивания, а износ приводит к возникновению дополнительных зазоров в элементах ИУ, что снижает виброустойчивость и точность позиционирования. С увеличением трения в системе снижается быстродействие, но за счет диссипации механической энергии быстро уменьшается амплитуда собственных колебаний ИУ, т.е. повышается его виброустойчивость.

Процесс газовыделения при взаимодействии в вакууме сопряженных тел сложен и неоднозначен [26]. Количественная оценка суммарного газового потока может быть выполнена на основе рассмотрения физического механизма образования каждой из составляющих суммарного потока, поступающих при работе функционального устройства манипулятора в вакуумный объем [2].

В УБМВ количество узлов трения минимально, но источниками газовыделения в них являются опорные узлы (подшипники), а также поверхности устройств, обращенные в вакуумный объем. По этой причине УБМВ, передающие малые и средние усилия, целесообразно конструировать в бескорпусном исполнении [2], [25]. Это позволяет снизить газовыделение для конкретного привода в 4-5 раз.

Ещё одним способом снизить натекание вредных газов (не менее чем в 7 раз) в технологическую среду является пескоструйная обработка тонкостенных герметизирующих элементов вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием [28].

Ответы на замечания рецензента

1. Положение рисунков приведено в соответствие.
2. Устранена ошибка с отсутствием ссылки на источник литературы [6].
3. Влияние параметров исполнительных устройств друг на друга в вакуумной технологической среде кратко представлены в разделе «Газовыделение». Чтобы полностью оценить взаимное влияние необходимо провести полный анализ всех элементов, входящих в состав конкретной технологической установки.
4. Оборудование высоких технологий – оборудование и системы управления для производства электровакуумных и полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, печатных плат, радиокомпонентов и других изделий электронной техники. Прямой зависимости между исполнительным устройством и конкретным оборудованием высоких технологий нет. По этой причине в статье нет ничего по этому вопросу.

Заключение

Рассмотренные параметры работоспособности ИУ на основе УБМВ и его элементов оказывают существенное влияние на показатели технологического оборудования – процент выхода годных и фактическую производительность, которую определяют по следующей зависимости:

$$Q_{\Phi} = \frac{1}{t_p + t_x + \sum t_{\Pi}} \quad (2)$$

где $\sum t_{\Pi}$ – внецикловые потери, приходящиеся на один рабочий цикл.

Принимая во внимание, что цикловая производительность $Q_{\Pi} = \frac{1}{t_p + t_x}$ можно записать:

$$Q_{\Phi} = \frac{Q_{\Pi}}{1 + \sum t_{\Pi} / (t_p + t_x)} = Q_{\Pi} \cdot \eta_{\Pi} \cdot \eta_{\Phi} \cdot \eta_{з\Pi} \cdot \eta_{з} \quad (3)$$

где η_{Π} – коэффициент параметрической надежности установки;

η_{Φ} – коэффициент надежности функционирования. Определяется надежностью установки;

$\eta_{з\Pi}$ – коэффициент запуска, характеризует потери времени при запуске оборудования;

$\eta_{з}$ – коэффициент загрузки, зависящий от уровня организации производства, позволяет учесть ту долю планового фонда времени, когда установка обеспечена всем необходимым в организационном аспекте.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Фролов А.И. Повышение герметичности и надежности вводов движения на основе магнитной жидкости для высоковакуумного технологического оборудования : дис. ... канд. т. н. / Фролов Александр Иванович. — Москва, 1986. — 180 с.
2. Кузнецов П.С. Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: Микроинженерия магнитных устройств / П.С. Кузнецов, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов [и др]. — Ивантеевка: Издательство НИИ предельных технологий, 2013. — Т. 6.
3. Синодеев И.В. Разработка и исследование механизмов поступательного движения на базе планетарных винтовых передач с внешним сопряжением для вакуумного технологического оборудования : дис. ... к. т. н. / Синодеев Игорь Вячеславович. — Владимир, 1984. — 157 с.
4. Демихов К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин — Москва: Машиностроение, 2009. — 590 с.
5. Фролов Е.С. Механические вакуумные насосы / Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев — Москва: Машиностроение, 1989. — 288 с.
6. Семенов Г.П. Исследование гидромеханического привода постоянной частоты вращения и разработка способов повышения его быстродействия : дис. ... к. т. н. / Семенов Геннадий Петрович. — Волгоград, 1996. — 142 с.
7. Li J. On the sensorless synchronous direct drive control of permanent magnet motor for three-blade roots vacuum pump / J. Li, H. Ana, Y. Luc [et al.] // Energy Reports. — 2023. — № 9. — P. 828–837. — DOI: 10.1016/j.egy.2023.04.340.
8. Zhang C. A smith-predictor-assisted adaptive load disturbance rejection controller for speed variation suppression of PMSM drive / C. Zhang, L. Zhang, D. Wang [et al.] // Electrical Power and Energy Systems. — 2024. — № 155. — DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109666.
9. Kang X. Simultaneous vibration isolation and energy harvesting via a new negative stiffness system with inertial amplifier / X. Kang, X. Wang, Q. Lei [et al.] // Journal of Engineering Research. — 2024. — DOI: 10.1016/j.jer.2024.04.012.
10. Ponci L.P. Simplified procedure for vibration analysis and dynamic balancing in mechanical systems with beats frequency / L.P. Ponci, G. Creci, J.C. Menezes // Measurement. — 2021. — № 174. — DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109056.

11. Кинаш Н.Ж. Режимы динамического гашения колебаний в системах с несколькими степенями свободы / Н.Ж. Кинаш, В.Б. Кашуба, Д.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. — 2017. — № 1 (33). — С. 19–28. — DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-19-28.
12. Елисеев А.В. Формирование математических моделей вибрационных взаимодействий элементов технических средств транспортного и технологического назначения / А.В. Елисеев, А.С. Миронов, С.В. Елисеев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2022. — № 1. — С. 32–42. — DOI: 10.17308/sait.2022.1/9199.
13. Eliseev A.V. Dynamic invariants in the evaluation of structural features of mechanical oscillatory systems under the condition of connectivity of external force disturbances / A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.V. Nikolaev // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2022. — № 30. — P. 47–56. — DOI: 10.26160/2474-5901-2022-30-47-56.
14. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов / Г.Я. Пановко. — Москва; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. — 176 с.
15. Пат. 106323 Российская Федерация, МПК7 F16F 6/00. Виброгаситель для прецизионно-стерильного оборудования / Ивашов Е.Н. — № 201015183811; заявл. 2010-12-17; опубл. 2011-07-10, Бюллетень № 19. — 2 с.
16. Бруевич Н.Г. Основы нелинейной теории точности и надежности устройств / Н.Г. Бруевич, В.И. Сергеев. — Москва: Наука, 1976. — 136 с.
17. Бруевич Н.Г. Основы теории точности механизмов / Н.Г. Бруевич, Е.А. Правоторова, В.И. Сергеев — Москва: Наука, 1988. — 236 с.
18. Коротков В.П. Основы метрологии и точности механизмов приборов / В.П. Коротков, Б.А. Тайц — Москва: Машгиз, 1961. — 400 с.
19. Крайнев А.Ф. Механика машин. Фундаментальный словарь / А.Ф. Крайнев — Москва: Машиностроение, 2000. — 904 с.
20. Тимофеева Г.А. Теория механизмов и механика машин / Г.А. Тимофеева. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 654 с.
21. Тимофеева Г.А. Анализ влияния ошибок изготовления деталей волновой зубчатой передачи на ее кинематическую погрешность / Г.А. Тимофеева, Ф.И. Фурсяк // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2016. — № 10 (679). — С. 3–8.
22. Кузнецов П.С. Выбор типа электродвигателя для приводов устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Под ред. А.С. Сигова. — Москва: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011. — Вып. 4. — С. 234–236.
23. Ивашов Е.Н. Теория механизмов и машин. Проектирование элементов и устройств технологических систем электронной техники : учебник для бакалавриата и магистратуры / Е.Н. Ивашов, П.А. Лучников, А.С. Сигов [и др.]. — Москва: Юрайт, 2020. — 369 с.
24. Кузнецов П.С. Влияние магнитного поля на микрочастицы, генерируемые из внутрикамерных устройств вакуумного технологического и аналитического оборудования / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Под ред. А.С. Сигова. — Москва: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011. — Вып. 1. — С. 109–111.
25. Кузнецов П.С. Экспериментальные исследования размеров микрочастиц из вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Под ред. А.С. Сигова. — Москва: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012. — Вып. 1. — С. 160–162.
26. Александрова А.Т. Механика и физика точных вакуумных механизмов в 2 т / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков [и др.]. — Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана: НПК «Интелвак»: Вакууммаш, 2002. — Т. 2.
27. Кузнецов П.С. Расчёт и выбор шарикоподшипников для сверхвысоковакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Под ред. А.С. Сигова. — Москва: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2011. — Вып. 4. — С. 237–238.
28. Кузнецов П.С. Экспериментальные исследования газопроницаемости тонкостенных герметизирующих элементов вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием / П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Под ред. А.С. Сигова. — Москва: Энергоатомиздат, 2013. — Вып. 2. — С. 217–220.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Frolov A.I. Povyshenie germetichnosti i nadezhnosti vvodov dvizheniya na osnove magnitnoj zhidkosti dlja vysokovakuumnogo tehnologicheskogo oborudovaniya [Improving the tightness and reliability of magnetic fluid-based motion inputs for high-vacuum process equipment] : dis. ...of PhD in Engineering / Frolov Alexander Ivanovich. — Moscow, 1986. — 180 p. [in Russian]
2. Kuznetsov P.S.. Mikro- i nanoinzheneriya v jelektronnom mashinostroenii: Mikroinzheneriya magnitnyh ustrojstv [Micro- and nanoengineering in electronic engineering: Microengineering of magnetic devices] / P.S. Kuznetsov, V.A. Vasin, E.N. Ivashov [et al.]. — Ivanteevka: Publishing House of the Research Institute of Extreme Technologies, 2013. — Vol. 6. [in Russian]
3. Sinodeev I.V. Razrabotka i issledovanie mehanizmov postupatel'nogo dvizheniya na baze planetarnyh vintovyh peredach s vneshnim soprjazheniem dlja vakuumnogo tehnologicheskogo oborudovaniya [Development and research of

translational motion mechanisms based on planetary screw gears with external coupling for vacuum technological equipment] : dis....of PhD in Natural sciences / Synodeev Igor Vyacheslavovich. — Vladimir, 1984.— 157 p. [in Russian]

4. Demihov K.E. Vakuumnaja tehnika: spravocnik [Vacuum technology: a reference book] / K.E. Demihov, Ju.V. Panfilov, N.K. Nikulin — Moskva: Mashinostroenie, 2009. — 590 p. [in Russian]

5. Frolov E.S. Mehanicheskie vakuumnnye nasosy [Mechanical vacuum pumps] / E.S. Frolov, I.V. Avtonomova, V.I. Vasil'ev — Moskva: Mashinostroenie, 1989. — 288 p. [in Russian]

6. Semenov G.P. Issledovanie gidromehanicheskogo privoda postojannoj chastoty vraschenija i razrabotka sposobov povysenija ego bystrodejstvija [Investigation of the hydromechanical drive of constant speed and development of ways to increase its performance] : dis. ...of PhD in Engineering / Semenov Gennady Petrovich. — Volgograd, 1996.— 142 p. [in Russian]

7. Li J. On the sensorless synchronous direct drive control of permanent magnet motor for three-blade roots vacuum pump / J. Li, H. Ana, Y. Luc [et al.] // Energy Reports. — 2023. — № 9. — P. 828–837. — DOI: 10.1016/j.egy.2023.04.340.

8. Zhang C. A smith-predictor-assisted adaptive load disturbance rejection controller for speed variation suppression of PMSM drive / C. Zhang, L. Zhang, D. Wang [et al.] // Electrical Power and Energy Systems. — 2024. — № 155. — DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109666.

9. Kang X. Simultaneous vibration isolation and energy harvesting via a new negative stiffness system with inertial amplifier / X. Kang, X. Wang, Q. Lei [et al.] // Journal of Engineering Research. — 2024. — DOI: 10.1016/j.jer.2024.04.012.

10. Ponci L.P. Simplified procedure for vibration analysis and dynamic balancing in mechanical systems with beats frequency / L.P. Ponci, G. Creci, J.C. Menezes // Measurement. — 2021. — № 174. — DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109056.

11. Kinash N.Zh. Rezhimy dinamicheskogo gashenija kolebanij v sistemah s neskol'kimi stepenjami svobody [Modes of dynamic vibration damping in systems with several degrees of freedom] / N.Zh. Kinash, V.B. Kashuba, D.H. Nguen // Sistemy. Metody. Tehnologii [The System. Methods. Technologies]. — 2017. — № 1 (33). — P. 19–28. — DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-19-28. [in Russian]

12. Eliseev A.V. Formirovanie matematicheskikh modelej vibratsionnyh vzaimodejstvij elementov tehniceskikh sredstv transportnogo i tehnologicheskogo naznachenija [Formation of mathematical models of vibration interactions of elements of technical means of transport and technological purposes] / A.V. Eliseev, A.S. Mironov, S.V. Eliseev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology]. — 2022. — № 1. — P. 32–42. — DOI: 10.17308/sait.2022.1/9199 [in Russian]

13. Eliseev A.V. Dynamic invariants in the evaluation of structural features of mechanical oscillatory systems under the condition of connectivity of external force disturbances / A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.V. Nikolaev // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2022. — № 30. — P. 47–56. — DOI: 10.26160/2474-5901-2022-30-47-56.

14. Panovko G.Ja. Dinamika vibratsionnyh tehnologicheskikh protsessov [Dynamics of vibration technological processes] / G.Ja. Panovko. — Moskva; Izhevsk: Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika, 2006. — 176 p. [in Russian]

15. Pat. 106323 Russian Federation, MPK201015183811 MПК7 F16F 6/00. Vibrogasitel' dlja pretsizionno-steril'nogo oborudovanija [Vibration dampener for precision sterile equipment] / Ivashov E.N. — № 201015183811; appl. 2010-12-17; publ. 2011-07-10, Bjulleten' № 19. — 2 p. [in Russian]

16. Bruevich N.G. Osnovy nelinejnoj teorii tochnosti i nadezhnosti ustrojstv [Fundamentals of the nonlinear theory of accuracy and reliability of devices] / N.G. Bruevich, V.I. Sergeev. — Moskva: Nauka, 1976. — 136 p. [in Russian]

17. Bruevich N.G. Osnovy teorii tochnosti mehanizmov [Fundamentals of the theory of precision mechanisms] / N.G. Bruevich, E.A. Pravotorova, V.I. Sergeev — Moskva: Nauka, 1988. — 236 p. [in Russian]

18. Korotkov V.P. Osnovy metrologii i tochnosti mehanizmov priborov [Fundamentals of metrology and accuracy of instrument mechanisms] / V.P. Korotkov, B.A. Tajts — Moskva: Mashgiz, 1961. — 400 p. [in Russian]

19. Krajnev A.F. Mehanika mashin. Fundamental'nyj slovar' [Mechanics of Cars. A Fundamental Dictionary] / A.F. Krajnev — Moskva: Mashinostroenie, 2000. — 904 p. [in Russian]

20. Timofeeva G.A. Teorija mehanizmov i mehanika mashin [Theory of mechanisms and mechanics of machines] / G.A. Timofeeva. — Moskva: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2012. — 654 p. [in Russian]

21. Timofeeva G.A. Analiz vlijanija oshibok izgotovlenija detalej volnovoj zubchatoj peredachi na ee kinematicheskiju pogreshnost' [Analysis of the influence of manufacturing errors of wave gear parts on its kinematic error] / G.A. Timofeeva, F.I. Fursjak // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering]. — 2016. — № 10 (679). — P. 3–8. [in Russian]

22. Kuznetsov P.S. Vybor tipa elektrodvigatelja dlja privodov ustrojstv s beskontaktnym magnitnym vzaimodejstviem [Choosing the type of electric motor for drives of devices with non-contact magnetic interaction] / P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanchikov // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroenija [Fundamental Problems of Electronic Instrumentation] / Ed. by A.S. Sigova. — Moskva: MGTU MIREA – IRE RAN, 2011. — Iss. 4. — P. 234–236. [in Russian]

23. Ivashov E.N. Teorija mehanizmov i mashin. Proektirovanie elementov i ustrojstv tehnologicheskikh sistem elektronnoj tehniki : ucbebnik dlja bakalavriata i magistratury [Theory of mechanisms and machines. Design of elements and devices of technological systems of electronic equipment : textbook for bachelor's and master's degrees] / E.N. Ivashov, P.A. Luchnikov, A.S. Sigov [et al.]. — Moskva: Jurajt, 2020. — 369 p. [in Russian]

24. Kuznetsov P.S. Vlijanie magnitnogo polja na mikrochastitsy, generiruemye iz vnutrikamernyh ustrojstv vakuumnogo tehnologicheskogo i analiticheskogo oborudovanija [The effect of a magnetic field on microparticles generated from in-chamber devices of vacuum technological and analytical equipment] / P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanchikov // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroenija [Fundamental Problems of Electronic Instrumentation] / Ed. by A.S. Sigova. — Iss. 1. — Moskva: MGTU MIREA – IRE RAN, 2011. — P. 109–111. [in Russian]

25. Kuznetsov P.S. Eksperimental'nye issledovaniya razmerov mikrochastits iz vakuumnyh ustrojstv s beskontaktnym magnitnym vzaimodejstviem [Experimental studies of the size of microparticles from vacuum devices with non-contact magnetic interaction] / P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanchikov // *Fundamental'nye problemy radioelektronnoho priborostroenija* [Fundamental Problems of Electronic Instrumentation] / Ed. by A.S. Sigova. — Moskva: MGTU MIREA – IRE RAN, 2012. — Iss. 1. — P. 160–162. [in Russian]

26. Aleksandrova A.T. Mehanika i fizika tochnyh vakuumnyh mehanizmov [Mechanics and physics of precision vacuum mechanisms] in 2 vol / A.T. Aleksandrova, E.N. Ivashov, S.V. Stepanchikov [et al.]. — Moskva: Bauman Moscow State Technical University: NPC Intelvak: Vacuummash, 2002. — Vol. 2. [in Russian]

27. Kuznetsov P.S. Raschet i vybor sharikopodshipnikov dlja sverhвысокovakuumnyh ustrojstv s beskontaktnym magnitnym vzaimodejstviem [Calculation and selection of ball bearings for ultrahigh vacuum devices with non-contact magnetic interaction] / P.S. Kuznetsov, E.N. Ivashov, S.V. Stepanchikov // *Fundamental'nye problemy radioelektronnoho priborostroenija* [Fundamental Problems of Electronic Instrumentation] / Ed. by A.S. Sigova. — Moskva: MGTU MIREA – IRE RAN, 2011. — Iss. 4. — P. 237-238. [in Russian]

28. Kuznetsov P.S. Eksperimental'nye issledovaniya gazopronitsaemosti tonkostennyh germetizirujuschih elementov vakuumnyh ustrojstv s beskontaktnym magnitnym vzaimodejstviem [Experimental studies of gas permeability of thin-walled sealing elements of vacuum devices with non-contact magnetic interaction] / P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanchikov // *Fundamental'nye problemy radioelektronnoho priborostroenija* [Fundamental Problems of Electronic Instrumentation] / Ed. by A.S. Sigova. — Moskva: Energoatomizdat, 2013. — Iss. 2. — P. 217–220. [in Russian]