ISSN 0042-4633

ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

12/2014

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Нижегородов А. И. — Радиально-поршневая гидромашина с фазово-объемным регулированием подачи и режимом амплитудно-частотной модуляции для приводов вибрационных сейсмоиспытательных платформ . . . 3

Иванов А. С., Фомин М. В., Ермолаев М. М., Чиркин А. В. — Профили зубьев зубчатых колес . . . 9

Теренченко А. С., Карпухин К. Е., Шорин А. А., Скляринский С. Ф. — Оптимизация потерь в тяговом асинхронном двигателе в составе комбинированной энергоустановки . . . 12

Шин И. Г., Муминов М. Р., Шодмонкулов З. А, Назаров С. Р. — Оценка скрытой энергии деформации в поверхностном слое деталей по диаграмме деформирования материалов . . . 15

Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. — Моделирование остаточных напряжений на разных этапах жизненного цикла изделий . . . 21

Салтыков М. А., Сиротенко И. В. — Концептуальный подход к конструированию среднеоборотных форсированных дизелей . . . 26

Медведев А. М., Литовка Г. В. — Повышение эффективности мероприятий по снижению уровня шума виброабразивных станков . . . 31

Асанов Р. Э., Кузнецов А. П., Косов М. Г. — Инженерный метод оценки и выбора мехатронных модулей по интегральным параметрам при проектировании технических устройств . . . 34

Юркевич В. В., Лушников П. В. — Влияние дисбаланса на работу шпинделя металлообрабатывающего станка . . . 41

Галкин М. Г., Смагин А. С. — Вероятностный расчет технологических размерных цепей с учетом колебаний значений технологических припусков . . . 44

Савкин А. Н., Андроник А. В., Суханов М. А. — Оценка предела усталости элементов подвески автомобиля в программе SolidWorks . . . 47

Абдуллаев А. И., Наджафов А. М., Саламов А. А. — Поисковое конструирование мультипликатора ветроэнергетического агрегата . . . 50

Вавилов В. Е. — Параметры гибридного магнитного подшипника при осевом смещении магнитных колец . . . 53

Перекрестов А. П., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н. — Применение модифицированных смазочных материалов для повышения износостойкости деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля . . . 57

Рождественский Ю. В., Камалтдинов В. Г., Малоземов А. А., Хозенюк Н. А. — Эффективная двигатель-генераторная установка для малой энергетики . . . 60

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. — Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в водной среде . . . 64

Кухарь В. Д., Киреева А. Е., Сорвина О. В. — Повышение эффективности работы индуктора-концентратора для магнитно-импульсной обработки металлов . . . 66

Мартиросян А. М., Агбалян А. С., Ордян Н. А., Казарян А. Н. — Изготовление алмазных инструментов на металлической связке . . . 68

Серия статей
"Проблемы теории и практики резания материалов"

Козлов А. М., Малютин Г. Е. — Повышение производительности чистового фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ . . . 71

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

Омельченко И. Н., Лазарев С. В., Комарова С. Г. — Расчет потерь в производственном процессе при построении карты потока создания ценности . . . 75

Указатель статей, опубликованных в журнале "Вестник машиностроения" за 2014 г. . . . 82

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Nizhegorodov A. I. — Radial-piston hydraulic machine with phase volume control of feed and amplitude-frequency modulation mode for drives of vibrational seismic test platforms

Ivanov A. S., Fomin M. V., Ermolaev M. M., Chirkin A. V. — Teeth profiles of gear wheels

Terenchenko A. S., Karpukhin K. E., Shorin A. A., Sklyarinskiy S. F. — Optimization of losses in traction asynchronous motor as a part of combined power plant

Shin I. G., Muminov M. R., Shodmonkulov Z. A., Nazarov S. R. — Assessment of latent deformation energy in surface layer of parts based on schematized deformation curves of materials

Makhalov M. S., Blumenshtein V. Yu. — Modeling of residual stresses on the different stages of product life cycle

Saltykov M. A., Sirotenko I. V. — Conceptual approach to design medium-speed accelerated diesels

Medvedev A. M., Litovka G. V. — Increase of effectiveness of arrangement on noise level decrease of vibroabrasive machines

Asanov R. E., Kuznetsov A. P., Kosov M. G. — Engineering method of assessment and selection of mechatronic modules by integral parameters at design of technical devices

Yurkevich V. V., Lushnikov P. V. — Influence of disbalance on operation of spindle of metal-working machine

Galkin M. G., Smagin A. S. — Probability calculation of technological dimension chains taking into account tolerances of allowances

Savkin A. N., Andronik A. V., Sukhanov M. A. — Assessment of service life of automobile suspension in SolidWorks Software

Abdullaev A. I., Nadzhafov A. M., Salamov A. A. — Exploratory design of increaser of wind power generating unit

Vavilov V. E. — Parameters of hybrid magnetic bearing at axial deflection of magnetic rings

Perekrestov A. P., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N. — Application of modified lubricants for wear resistance improvement of cylinder-piston group parts of marine diesel

Rozhdestvenskiy Yu. V., Kamaltdinov V. G., Malozemov A. A., Khozenyuk N. A. — Effective engine-generator unit for small-scale power generation

MANUFACTURING ENGINEERING

Ageeva E. V., Ageev E. V., Karpenko V. Yu. — X-ray structural analysis of powder obtained from tungsten-containing wastes by electroerosion dispersion in water medium

Kukhar' V. D., Kiteeva A. E., Sorvina O. V. — Improvement of operating effectiveness of intensifier for magnetic pulse processing of metals

Martirosyan A. M., Agbalyan A. S., Otdyan N. A., Kazaryan A. N. — Production of diamond tools on metal matrix

A series of articles
"Problems of theory and practice of materials cutting"

Kozlov A. M., Malyutin G. E. — Capability improvement of finishing milling of concave surfaces of complicated shape on NC machines

ORGANIZATION AND ECONOMICS OF PRODUCTION

Omel'chenko I. N., Lazarev S. V., Komarova S. G. — Calculation of losses in production process at construction of flow map of adding value

Index of papers having been published in the "Vestnik mashinostroeniya" for 2014

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 05.10.2014. Подписано в печать 14.11.2014.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

© ООО "Издательство Машиностроение", "Вестник машиностроения", 2014

УДК 62-52.001.63

Р. Э. АСАНОВ (ОАО "НИПИ Тяжпромэлектропроект", г. Москва), А. П. КУЗНЕЦОВ, М. Г. КОСОВ, доктора технических наук (МГТУ "Станкин"), e-mail: stankin-okm@yandex.ru

Инженерный метод оценки и выбора мехатронных модулей по интегральным параметрам при проектировании технических устройств

Предлагается метод оценки технического уровня мехатронных модулей при их проектировании на основе интегральных коэффициентов, включающих в себя количественные параметры и качественные показатели и показатели их свойств.

Ключевые слова: мехатронный модуль, системы, комплексы, технический уровень, аналог, прототип, эквивалент, качественные показатели, количественные параметры, интегральный коэффициент.

The method of assessment of technical level of mechatronic modules at their design on the base of integral coefficients, which include quantitative parameters and qualitative characteristics, and their property indexes, is suggested.

Keywords: mechatronic module; systems; complexes; technical level; analogue, prototype; equivalent; qualitative characteristics; quantitative parameters; integral coefficient.

Поступательное развитие от механики к электромеханике и далее к мехатронике и мехатронным системам обусловлено в первую очередь появлением новых микроэлектронных и информационных технологий. Мехатронные системы компонуют из модулей движения, мехатронных модулей (ММ) и интеллектуальных ММ. Данные функциональные элементы отличаются уровнем интеграции, их классифицируют по числу степеней подвижности (от 1 до >3), виду подвижности (поступательное, вращательное), а также по техническим показателям (развиваемая сила или момент, рабочий ход, быстродействие, точность) [1].

Модули движения и ММ являются базой для создания интеллектуальных ММ. Фундаментальному определению мехатроники в полной мере соответствуют только интеллектуальные ММ, которые содержат все три определяющие подсистемы. По сравнению с ММ движения они имеют аппаратно-встроенную компьютерную часть.

В дальнейшем ММ и мехатронные системы (МС) будут объединяться в мехатронные комплексы на базе единых интеграционных платформ. Цель создания таких комплексов — обеспечить одновременно высокую производительность и гибкость технико-технологической среды путем возможной реконфигурации.

Сегодня создание МС немыслимо без новых информационных технологий автоматизированного проектирования, компьютерного моделирования и современных систем управления. Особую роль в развитии мехатроники играют интеллектуальные технологии, и в частности приложения к задачам управления функциональными движениями. Отличительной чертой интеллектуальных технологий является возможность системной обработки знаний [2]. Построение компьютерного управления МС на основе интеллектуальных технологий позволяет выполнять сложные движения высокого качества в условиях интенсивного изменения управляющих и возмущающих воздействий и неполной информации о внешней среде и рабочих объектах.

Применение МС и ММ обеспечивает следующее [3]:

исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации, упрощение кинематических цепей, что обеспечивает высокую точность и улучшенные динамических характеристик технических систем (ТС);

уменьшение массогабаритных показателей ТС ввиду конструктивной компактности модулей;

возможность объединения ММ в сложные МС и комплексы, обеспечивающие быструю реконфигурацию;

относительно низкую стоимость установки, настройки и технического обслуживания ТС благодаря модульности конструкции, унификации аппаратных и программных средств;

выполнение сложных движений благодаря адаптивному и интеллектуальному управлению.

Высокая точность, быстродействие, сложное перемещение выходного звена в пространстве и по времени определяются технологической постановкой задачи управления. При этом необходимо координировать управление пространственным перемещением МС с управлением различными внешними процессами: регулирование силового взаимодействия рабочего органа машины на объект при механической обработке, управление дополнительными технологическими воздействиями (тепловыми, электрическими, электрохимическими) при комбинированных методах обработки, управление вспомогательным оборудованием комплекса (конвейерами, загрузочными устройствами).

ММ используют в качестве конструктивных элементов при компоновке многомерных мехатронных машин и комплексов. Во многих случаях

частота вращения выходного вала мотор-редуктора должна изменяться, что можно достичь применением механических вариаторов, позволяющих регулировать частоту вращения, или электронных устройств, изменяющих частоту вращения вала электродвигателя. Каждый из данных способов имеет свои преимущества и недостатки, применяют их в зависимости от решаемых конструктивных и технологических задач.

Мехатронные изделия конструктивно и функционально являются самостоятельными изделиями, включающие в себя механическую, электрическую (электротехническую) и информационную части, которые можно использовать автономно и в различных комбинациях с другими модулями [1].

С развитием электронных технологий, позволяющих создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов, в ММ движения появились электронные и информационные устройства, что является их главным отличительным признаком от модулей движения.

Для создания современных технологических машин для автоматизированного машиностроения, необходимы разные ММ движения, которые должны обеспечивать: высокую точность исполнительных движений, надежность, долговечность, работу при различных возмущениях и в широком диапазоне температур окружающей среды. Кроме того, они должны иметь значительно меньшие массогабаритные показатели по сравнению с обычным электроприводом.

Требования к развиваемым усилиям, точности и скорости исполнительных движений определяются особенностями автоматизируемой технологической операции, а минимизация размеров ММ движения — встраиванием их в технические системы. Попытка синтеза ММ движения из имеющихся в наличии серийно выпускаемых компонентов может привести к технически и экономически неэффективным решениям. Поэтому целесообразно проектировать специализированные ММ движения с учетом их назначения.

ММ движения — функциональные элементы, из которых компонуют сложные МС. Потребительская стоимость или полезность мехатронных устройств определяются их назначением, технической характеристикой, а также такими показателями, как эстетичность и эргономичность. Чем выше показатели, отражающие полезность товара (потребительную стоимость), и ниже меновая стоимость (цена изделия), тем выше его конкурентоспособность.

Была поставлена задача — разработать методику оценки технического уровня ММ и их выбора. Поставленная задача решалась на основании системного анализа, который состоит из процедур: измерение, оценка, понятие решений. При этом такие компоненты системного анализа, как вход, процесс и выход должны рассматриваться совместно.

При создании конкурентоспособного технического устройства (ТУ) следует использовать комплекс взаимосвязанных методов, совместное применение которых обеспечит получение наиболее правильного решения [3]. Такими основными методами являются: выбор аналога ТУ; оценка его технического уровня; моделирование нового ТУ; экономическое обоснование целесообразности его создания; определение областей его эффективного применения.

Рассмотрим основные понятия, которые положены в основу поиска и сравнения ТУ. Такое понятие, как "подобие", в зависимости от степени отличия основных свойств ТУ может иметь следующие значения [4]: аналог, прототип, эквивалент, каждое из которых определяет степень совпадения показателей основных свойств ТУ. Очевидно, что для корректного и объективного определения перечисленных понятий необходимо однозначно классифицировать ТУ по упорядоченной совокупности характеристик.

Любое ТУ можно характеризовать двумя множествами характеристик: качественными (неизмеряемыми) и количественными (измеряемыми), каждое из которых состоит соответственно из n и m числа показателей и параметров, их сумма составляет полное множество характеристик, отражающих основные свойства ТУ.

Технические устройства будут подобными, если их множества качественных (n) и количественных (m) характеристик основных свойств не отличаются, следовательно, для ТУ справедливы следующие определения:

1) эквивалент — ТУ, у которого элементы множеств и качественных, и количественных характеристик основных свойств не отличаются, т. е. имеет место полное совпадение;

2) прототип — ТУ с минимальным числом отличающихся элементов множеств качественных и количественных характеристик основных свойств, т. е. максимальное их число совпадает;

3) аналог — ТУ с максимальным числом отличающихся элементов множеств качественных и количественных характеристик основных свойств.

Данный способ выбора аналога предполагает математические операции над множествами информационных массивов и программный поиск аналогов по таблицам фактографических данных.

Оценка технического уровня ТУ осуществляется на базе массива исходных данных — элементов множеств качественных и количественных характеристик основных свойств ТУ. При разработке метода были сформулированы требования: универсальность и минимизация объема информации.

Данный метод базируется на трех определениях:

1. Элементы множества качественных (n) и количественных (m) характеристик формируют N-векторное пространство.

2. Множество m_1 характеристик ТУ не менее предпочтительно множеству m_2 характеристик ТУ, если оно не имеет ни одного большего значения.

3. Диапазон значений характеристик определяется лучшими (минимальными или максимальными) величинами.

Технический уровень ТУ определяется эффективностью ее применения. Следовательно, из множества сравниваемых единиц ТУ при одинаковом эффекте от их применения и при равных условиях эксплуатации технический уровень выше у ТУ, которое обеспечивает наименьшие затраты. Технический уровень ММ характеризуется такими показателями, как производительность, точность, надежность, стоимость, материалоемкость, энергоемкость. При проведении оценки технического уровня ММ необходимо определить модель соответствия — технико-экономические показатели и показатели технического уровня.

При выборе аналога ММ необходимо учитывать следующее:

одинаковые назначение и область применения;

крутящий момент для аналога может быть выше крутящего момента оцениваемого ТУ, но не более, чем на 15 %; выбор аналога с меньшим крутящим моментом может заложить резерв повышения некоторых параметров, причем, чем меньше крутящий момент аналога, тем больше резерв;

рабочая зона обслуживания является важным параметром ММ, который в основном определяется кинематической структурой.

Такие характеристики, как назначение и область применения могут не иметь четких границ, так как в информационных данных часто приводят преднамеренно широкие диапазоны.

Главная задача проектирования ММ — получить технологическое решение в пределах одного размера рабочей зоны с наибольшим эффектом по быстродействию, наименьшей траектории перемещения, минимальных затратах мощности, металлоемкости, числу подвижных звеньев и при наиболее простом управлении. При выборе аналога есть четкие данные: способ установки (напольный, встроенный, подвесной), возможность или отсутствие перемещения (стационарный, подвижный).

Оценка технического уровня ТУ представляет собой совокупность операций, включающих в себя выбор перечня показателей, характеризующих техническое совершенство, определение их значений и сопоставление с базовыми образцами [4]. Оценка технического уровня ТУ может осуществляться с помощью единичных, комплексных, определяющих и интегральных показателей качества.

Сопоставление ТУ по единичным, комплексным и удельным показателям не дает однозначной и объективной оценки их технического уровня. Поэтому необходима разработка интегральных показателей [3, 4].

ГОСТ 25378—82 устанавливает основные характеристики и значимые свойства ММ, которые обусловливают функциональные показатели, т. е. их ***количественные характеристики*** [3]:

развиваемые максимальный и минимальный моменты M_{max} и M_{min}, Н · м;

рабочий ход (максимальный и минимальный) R_{max} и R_{min}, м;

угол поворота (максимальный и минимальный) V_{max} и V_{min}, градус;

точность позиционирования, %: линейная $\Delta_{лин}$ и угловая $\Delta_{угл}$;

скорость перемещения рабочего органа V_r, м/с;

частота вращения W_r, $с^{-1}$;

суммарная мощность приводов N_Σ, кВт;

масса без учета вспомогательных устройств G_m, кг;

габаритные размеры $H \times B \times L$, м;

диаметр выходного вала D_v, мм;

быстродействие T_f, м/с;

энергопотребление Э, кВт;

ресурс N_f, ч;

уровень шума V_v, дБ.

В табл. 1 представлен перечень ***качественных характеристик*** ММ, отражающих их функциональные свойства. Такие показатели, как быстродействие и точность определяют производительность и качественное состояние ТУ. Энергопотребление, показатель использования рабочего пространства, энергопотребление, энергоемкость и материалоемкость определяют производственные и эксплуатационные затраты за весь жизненный цикл изделия.

В соответствии с ГОСТ 15467—79 "Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения" коэффициенты технического или технико-экономического уровня в настоящее время уже не обеспечивают объективную и достоверную оценку технического уровня ММ. Поэтому для оценки технического уровня ММ были предложены следующие ***комплексные показатели***, которые объективно отражают их свойства и техническое состояние:

1. ***Коэффициент полезного использования рабочего пространства:***

$$K_{vr} = \left(\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}}\right) + \left(\frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}}\right);$$

для прямоугольной системы координат

$$K_{vr} = \frac{V - v}{V};$$

для угловой системы координат

$$K_{ur} = \frac{R - r}{R},$$

где V_{max}, R_{max} и V_{min}, R_{min} — максимальные, минимальные объем и размер рабочей зоны.

2. ***Коэффициент удельной производительности*** ММ, работающих в прямоугольной, угловой и цилиндрической системах координат, в том числе портальных, мостовых, консольных:

$$K_{\omega r} = \frac{M_{max}\left(W_r \frac{D_v}{2} + V_r\right) K_{vr}}{(\Delta_{уг} + \Delta_{лин})100}.$$

Тогда для прямоугольной системы координат

$$K_{\omega r} = \frac{Mv}{\Delta}, \ \frac{Н \cdot м}{мм \cdot с};$$

для цилиндрической, сферической и угловой систем координат

$$K_{\omega r} = \frac{MvR}{\Delta}.$$

3. ***Коэффициент полезного использования мощности:***

$$K_{nv} = \frac{M_{max}\left(W_r \frac{D_v}{2} + V_r\right)^2}{2\Sigma N},$$

для прямоугольной системы координат

$$K_{nv} = \frac{MV^2}{2N}, \ \frac{Н \cdot м^2}{с^2 \cdot Вт}.$$

4. ***Коэффициент удельного энергомомента:***

$$K_{nm} = \frac{M}{N} = \frac{M_{max}}{\Sigma N}, \ \frac{Н \cdot м}{Вт}. \quad (4)$$

5. ***Коэффициент удельного момента:***

$$K_{mg} = \frac{M}{G} = \frac{M_{max}}{G_m}, \ \frac{Н \cdot м}{кг}. \quad (5)$$

6. ***Коэффициент удельной энергоемкости:***

$$K_{ng} = \frac{MV^2}{2G} = \frac{M_{max}\left(W_r \frac{D_v}{2} + V_r\right)^2}{2G_m}, \ \frac{Н \cdot м^2}{с^2 \cdot кг}. \quad (6)$$

Для интегральной оценки технического уровнях ММ предлагается использовать ***интегральные характеристики***, полученные на базе положений, изложенных в работе [4], что повышает качество оценки их технического уровня, так как повышает чувствительность к диапазону изменения каждого составляющего параметра интегрального показателя.

Из вышеперечисленных комплексных показателей (коэффициентов) складываются ***интегральные коэффициенты технического уровня ММ:***

1. ***Коэффициент быстродействия и точности:***

$$K_{\Sigma m} = K_{\omega r} K_{nv} K_{mg} K_{nm} K_{ng}.$$

Таблица 1

Качественные характеристики ММ

Характеристика	Варианты
1. Система координат	Прямоугольная Цилиндрическая Сферическая
2. Способ установки	Напольный Встроенный Подвесной
3. Степень подвижности	Стационарный Мобильный Подвижный
4. Число степеней подвижности	1 2, 3 >3
5. Система управления	Цикловая Позиционная Контурная
6. Способ программирования	Обучаемый Аналитический
7. Вид привода	Электрический Пневматический Гидравлический Другой
8. Датчики	Отсутствуют Контактные Бесконтактные
9. Надежность	$T_О \geq 500$ ч, $T_В \leq 10$ ч, $K_{ТИ} \geq 0{,}97$; $T_О < 500$ ч, $T_В \geq 10$ ч, $K_{ТИ} < 0{,}97$
10. Универсальность	Самостоятельный Встроенный в узел Сложный механизм
11. Показатель компактности (габаритные размеры, число элементов, масса)	Конкретные значения
12. Вид передачи	Ременная Цепная Зубчатая
13. Вид подвижности	Поступательный Вращательный
14. Область применения	Станкостроение Приборостроение Медицина
15. Эксплуатационные свойства	Пылезащищенность Влагозащищенность
16. Вид эксплуатационной среды	Возмущающая Технологическая

Таблица 2

Мехатронные модули и проектируемые виртуальные модели

Модуль, модель	Вид	Изготовитель
1. ПД605	ММ	ООО "КБ мехатроники"
2. SGLGW	Серводвигатель	Omron-Yaskawa
3. RAN 28	ММ	Bonfiglioli Grup
4. 9IDGC-60WH	Мотор-редуктор	НПФ Электропривод
5. СПШ 20-23017	Интегрированный сервопривод	ЗАО "ЗМИ"
6. ШМ-2	Сервопривод линейного перемещения	
7. $ММ_{min}$ 8. $ММ_{max}$ 9. $ММ - M_N$ 10. $ММ_{\sigma}$ 11. $ММ - (M_N + 3\sigma)$ 12. $ММ - (M_N - 3\sigma)$	ММ	–

2. ***Коэффициент энергоемкости и энергопотребления:***

$$K_{\Sigma nv} = K_{nv}K_{nm}.$$

3. ***Коэффициент материалоемкости:***

$$K_{\Sigma g} = K_{mg}K_{ng}.$$

4. ***Коэффициент технического уровня:***

$$K_{\Sigma n} = K_{\omega r}K_{nv}K_{nm}K_{vr}K_{mg}K_{ng}.$$

Интегральную характеристику технического уровня ММ по неизмеряемым показателям определяют как средневзвешенное значение суммы произведений всех показателей:

$$K_{\Sigma H} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_i G_i}{\sum_{i=1}^{i=n} M_i}.$$

Максимальное значение интегральной характеристики $K_{\Sigma H} = 10$, минимальное равно нулю.

Суммарная интегральная характеристика по измеряемым и неизмеряемым показателям, определяющие технический уровень ММ, будет иметь вид:

$$K_{\Sigma} = K_{\Sigma n}K_{\Sigma N}.$$

Для оценки конкурентоспособности ММ кроме технических характеристик и эксплуатационных показателей следует учитывать их стоимость, следовательно, получим выражение

$$K_{\Sigma O} = \frac{K_{\Sigma n}K_{\Sigma H}}{C_{\text{р}}},$$

где $C_{\text{р}}$ — стоимость ММ.

В табл. 2 приведены некоторые выпускаемые ММ и проектируемые виртуальные модели (ВМ), составляющие базу исходных данных для определения направлений проектирования новых модулей, параметры которых сформированы путем виртуального синтеза.

В табл. 3 и 4 для исследуемых ММ и ВМ приведены коэффициенты значимости M_i и весомости q_i для определения по зависимости (2) значение коэффициента $K_{\Sigma H}$. В табл. 5 приведены значения качественных характеристик рассматриваемых ММ

Таблица 3

Коэффициенты значимости M_i качественных характеристик ММ и ВМ

Качественная характеристика	Номер ММ или ВМ в соответствии с табл. 2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Система координат	7	5	7	6	6	9	5	9	6,7	0,1	7,0	6,4
2. Способ установки	5	7	6	8	5	6	5	8	6,2	0,1	6,5	5,9
3. Степень подвижности	4	6	1	7	3	3	1	7	4,0	0	4,0	4,0
4. Число степеней подвижности	3	4	4	5	2	5	2	5	3,8	0,1	4,1	3,5
5. Система управления	6	3	3	4	3	6	3	6	4,2	0,1	4,5	3,9
6. Способ программирования	1	1	2	2	4	8	1	8	3	0	3	3
7. Вид привода	2	2	5	3	8	6	3	8	4,3	0,1	4,6	4,0
8. Датчики	8	8	8	1	1	7	1	8	5,5	0	5,5	5,5
9. Надежность	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0	9	9
10. Универсальность	5	6	4	4	1	6	1	6	4,3	0,1	4,6	4,0
11. Показатели компактности (габаритные размеры, число элементов, масса)	8	2	2	9	2	9	2	9	5,3	0,1	5,6	5,0
12. Вид передачи	7	5	9	1	3	5	1	9	5	0	5	5
13. Вид подвижности	6	7	5	6	7	8	5	8	6,5	0	6,5	6,5
14. Область применения	3	1	7	5	2	2	1	7	3,3	0,1	3,6	3,0
15. Эксплуатационные свойства	1	6	3	9	7	6	1	9	5,3	0,1	5,6	5,0
16. Вид эксплуатационной среды	2	4	1	3	3	8	1	8	3,5	0	3,5	3,5

Таблица 4

Коэффициенты весомости g_i качественных характеристик ММ и ВМ

Качественная характеристика	Вариант	Номер ММ или ВМ в соответствии с табл. 2											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Система координат	Прямоугольная	0	7	0	0	0	7	0	8	2,3	0,4	3,5	1,1
	Цилиндрическая	8	0	7	6	8	0			4,8	0,1	5,1	3,9
	Сферическая	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
2. Способ установки	Напольный	6	6	8	0	0	6	5	9	4,3	0,1	4,6	4,0
	Встроенный	7	7	7	7	9	5			7,0	0	7,0	7,0
	Подвесной настенный	0	5	0	0	0	0			0,9	0,1	1,2	0,6
	Подвесной портальный	0	5	0	6	0	0						
	Подвесной мостовой	0	0	0	0	0	0						
3. Степень подвижности	Стационарный	9	6	9	7	7	6	6	9	7,3	0,1	7,6	7,0
	Подвижный	0	8	5	5	5	8			5,2	0,1	5,5	4,9
	Мобильный	0	9	0	3	6	9			4,5	0	4,5	4,5
4. Число степеней подвижности	≤ 1	6	6	0	8	8	7	0	8	5,8	0,6	7,6	4
	2, 3	0	0	8	0	0	0			1,3	0,4	2,5	0,1
	≥ 3	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
5. Система управления	Цикловая	7	0	0	0	0	0	0	9	1,2	0,1	1,5	0,9
	Позиционная	0	5	7	0	0	0			2,0	0	2,0	2,0
	Контурная	0	7	0	7	9	8			5,2	0,1	5,5	4,9
6. Способ программирования	Обучаемый	0	0	0	0	0	0	5	8	0	0	0	0
	Аналитический	5	8	6	8	7	8			7,0	0	7,0	7,0
7. Вид привода	Пневматический	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0
	Гидравлический	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
	Электрический	1	6	9	7	9	7			6,5	0,4	7,7	5,3
8. Датчики	Отсутствуют	0	0	0	0	0	0	5	8	0	0	0	0
	Контактные	8	5	7	0	6	6			5,3	0,1	5,6	5,0
	Бесконтактные	0	6	0	0	0	0			1,0	0	1,0	1,0
9. Надежность	$T_о \geq 500$ ч; $T_в \leq 10$ ч; $K_{ТИ} \geq 0{,}97$	9	8	8	8	8	8	8	9	8,2	0,1	8,5	7,9
	$T_о < 500$ ч; $T_в > 10$ ч; $K_{ТИ} < 0{,}97$	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
10. Универсальность	Самостоятельный	7	6	6	4	0	9	4	9	5,3	0,1	5,6	5,0
	Встроенный в узел	5	4	8	8	8	7			6,7	0,1	7,0	6,4
	Сложный механизм	0	3	2	1	7	0			2,2	0,1	2,5	1,9
11. Показатели компактности (габаритные размеры, число элементов, масса)	Габаритные размеры	6	3	6	8	6	8	1	8	6,2	0,1	6,5	5,9
	Число элементов	6	3	5	6	7	7			5,7	0,1	6,0	5,4
	Масса	4	1	1	2	8	6			3,7	0,1	4	3,4
12. Вид передачи	Ременная	0	9	0	0	0	0	0	9	1,5	0	1,5	1,5
	Цепная	6	0	0	0	0	0			1,0	0	1,0	1,0
	Зубчатая	8	0	2	8	9	5			5,3	0,1	5,6	5,0
13. Вид подвижности	Поступательное	0	8	0	0	0	6	0	10	2,3	0,1	2,6	2,0
	Вращательное	7	0	10	7	8	0			5,3	0,1	5,6	5,0
14. Область применения	Станкостроение	0	5	8	8	7	6	0	8	5,7	0,1	6,0	5,4
	Приборостроение	0	8	0	3	0	4			2,5	0	2,5	2,5
	Машиностроение	8	5	0	5	8	0			4,3	0,1	4,6	4,0
15. Эксплуатационные свойства	Пылезащищенность	6	6	7	8	7	8	6	8	7,0	0	7,0	7,0
	Влагозащищенность	8	0	6	8	5	6			5,5	0	5,5	5,5
16. Вид эксплуатационной среды	Возмущающая	1	5	5	3	5	6	1	6	4,2	0,1	4,5	3,9
	Климатическая	6	6	6	5	0	5			4,7	0,1	5,0	4,4

Таблица 5

Значения количественных характеристик ММ и ВМ

Номер ММ или ВМ в соответствии с табл. 2	M_{max}, Н · м	M_{min}, Н · м	V_{max}, градус	V_{min}, градус	R_{max}, м	R_{min}, м	$\Delta_{лин}$, %	$\Delta_{угл}$, %	V_r, м/с	W_r, $с^{-1}$	D_y, мм	G_m, кг	N_Σ, кВт	C_p
1	110	12,50	360,0	30,00	0	0	0	0,10	0,88	55	0,032	8,60	50	7,2
2	140	10,00	0	0	1400	200	0,07	0	1,30	0	0	14,20	80	15,5
3	150	8,00	360,0	20,00	0	0	0	0,08	1,00	100	0,020	11,10	70	7,3
4	160	25,00	360,0	17,00	0	0	0	0,09	1,02	85	0,024	10,90	75	7,9
5	180	12,00	360,0	15,00	0	0	0	0,05	0,81	90	0,018	9,90	60	7,8
6	110	20,00	0	0	500	50	0,06	0	1,40	0	0	11,5	65	8,3
7	110	8,00	110,0	8,00	360	15	500	50	0,06			0,05	0,81	8,6
8	180	25,00	180,0	25,00	360	30	1400	200	0,07			0,10	1,40	11,5
9	141,7	14,60	141,7	14,60	240,0	13,7	316,7	41,7	0,02			0,19	1,07	11,03
10	27,9	6,53	27,9	6,53	185,9	11,78	567,2	80,10	0,03			0,35	0,23	1,87
11	225,3	34,20	225,3	34,20	797,7	49,0	2018,1	282,0	0,12			1,24	1,77	16,64
12	58,1	−5,00	58,1	−5,00	−317,7	−21,7	−1384,8	−198,6	−0,08			−0,86	0,37	5,43

Таблица 6

Значения интегральных коэффициентов и характеристик технического уровня ММ и ВМ

Номер ММ или ВМ в соответствии с табл. 2	Интегральные коэффициенты						Интегральные характеристики			
	K_{vr}	$K_{\omega r}$	K_{mv}	K_{nm}	K_{mg}	K_{ng}	$K_{\Sigma M}$	$K_{\Sigma NV}$	$K_{\Sigma G}$	$K_{\Sigma N}$
1	0,92	8,87	0,85	2,20	12,79	4,95	1053,40	1,87	63,35	965,61
2	0,86	22,29	1,48	1,75	9,86	8,33	4736,91	2,59	82,14	4060,21
3	0,94	17,71	1,07	2,14	13,51	6,76	3712,28	2,30	91,31	3506,04
4	0,95	17,28	1,11	2,13	14,68	7,64	4584,74	2,36	112,09	4368,23
5	0,96	27,95	0,98	3,00	18,18	5,96	8947,49	2,95	108,45	8574,68
6	0,90	23,10	1,66	1,69	9,57	9,37	5813,16	2,81	89,66	5231,85
7	0,55	4,90	0,48	1,47	9,57	3,14	103,79	0,71	30,01	57,09
8	1,00	50,40	3,53	3,60	20,93	20,51	274 942,97	12,70	429,31	274 942,97
9	0,922	19,533	1,192	2,152	13,098	7,168	4808,00	2,48	91,17	4451,10
10	0,037	6,531	0,312	0,468	3,210	1,610	2588,37	0,39	17,85	2482,54
11	1,033	39,126	2,126	3,557	22,729	12,000	12 573,10	3,65	143,73	11 898,71
12	0,810	−0,060	0,257	0,746	3,468	2,337	−2957,11	1,31	37,60	−2996,50

Таблица 7

Значения обобщенных интегральных показателей технического уровня ММ и ВМ

Номер ММ или ВМ в соответствии с табл. 2	Номер качественной характеристики по табл. 2																Интегральные характеристики		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$K_{\Sigma H}$	K_Σ	$K_{\Sigma O}$
1	56	35	36	18	42	5	20	64	81	25	48	42	42	24	8	12	7,25	7000,69	0,97
2	35	35	48	24	15	8	12	48	72	36	6	45	56	8	36	24	6,70	27 208,69	1,76
3	49	48	9	32	21	12	45	56	72	32	12	18	50	56	21	6	7,09	24 857,84	3,40
4	36	56	49	40	28	16	21	0	72	36	72	8	42	40	72	15	7,35	32 106,53	4,06
5	48	45	21	16	27	28	72	6	72	8	16	27	56	16	49	15	7,91	67 825,72	8,69
6	63	36	27	35	48	64	42	42	72	54	72	25	48	12	48	48	7,14	37 355,38	4,50
7	0	25	6	0	0	5	3	5	72	4	6	0	0	0	6	1	3,50	199,80	0,013
8	72	72	63	40	54	64	72	64	81	54	72	81	80	56	72	48	8,48	2 331 516,38	323,64
9	47,8	42,5	31,7	27,5	30,2	22,2	35,3	36,0	73,5	31,8	37,7	27,5	49,0	26,0	39,0	20,0	7,2	32 725,8	3,9
10	10,9	8,6	15,7	9,7	12,5	22,0	22,2	26,7	3,7	15,1	30,3	14,1	6,3	18,5	22,6	14,9	0,4	20 039,69	2,71
11	80,8	68,4	78,8	56,5	67,8	88,2	102,0	116,0	84,5	77,1	128,6	69,8	67,9	81,6	106,9	64,7	8,4	92 844,9	12,0
12	14,9	16,6	−15,5	−1,5	−7,5	−43,8	−31,3	−44,0	62,5	−13,5	−53,3	−14,8	30,1	−29,6	−28,9	−24,7	6,1	−27 393,3	−4,2