

II

PROBLEMY JAKOŚCI POŁĄCZEŃ MONTAŻOWYCH

Wadim NIKOŁAJEW
Uniwersytet Techniczny
Samara, Rosja

STEROWANIE ZALEŻNOŚCIAMI WYMIAROWYMI W ZROBOTYZOWANYM MONTAŻU DOKŁADNYCH POŁĄCZEŃ

УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРНЫМИ СВЯЗЯМИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Качество изделий машиностроения в значительной степени определяется точностью сборочных соединений. Важнейшими показателями точности являются координаты относительного положения и движения рабочих поверхностей, коэффициенты жёсткости и демпфирования, напряжения и деформации в деталях. Образование указанных показателей в большей степени следует отнести к процессам сборки соединений. Процесс сборки реализуется через построение и преобразование размерных связей и свойств материала и подвержен изменчивости. Изменчивость является следствием действия большого числа систематических и случайных факторов, приводящих к отклонениям действительных показателей качества от их целевых значений. Эффективным методом ограничения отклонений показателей качества от требуемых величин является управление процессом. Автоматизация на основе промышленной робототехники должна стать основным направлением развития технологии сборки высокоточных соединений и исключить ошибки из-за недооценки погрешностей изготовления деталей и ограниченных возможностях человека в воздействии на процесс [1].

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Управлению процессами сборки соединений посвящено большое число работ. По рассматриваемым в них объектам и задачам управления можно указать на два основных направления исследований.

Первое направление в качестве объекта управления рассматривает процесс соединения деталей как совмещение двух прямоугольных систем координат, принадлежащих этим деталям. Задача управления в этом случае состоит в выполнении условий собираемости [2]. В качестве средств реализации такого управления используются устройства и системы пассивной и активной адаптации [3]. Вместе с тем, очевидно, что сборку соединений нельзя рассматривать как механическое совмещение сопрягаемых поверхностей деталей. Необходимо сознательно и активно формировать в соединениях требуемые служебным назначением размерные связи [4].

Второе направление в качестве объекта управления рассматривает процесс достижения точности соединения [2]. Задача управления – обеспечение наименьших из возможных отклонений показателей точности соединений от целевых значений. Наиболее просто эта задача решается при использовании метода неполной взаимозаменяемости [5], когда роботизированная сборочная система оснащается техническими средствами контроля и испытания собранных соединений. В партии собранных соединений выявляются дефектные, в отношении которых выполняются процедуры разборки, переконфигурации или утилизации.

Время и энергия на выполнение операций, в результате которых образуются несоответствующие соединения, затрачиваются бесполезно, что снижает их эффективность. По этому направлению разработаны научные основы и технические решения сопряжения деталей наиболее рациональным способом с учётом имеющихся погрешностей деталей, их силового взаимодействия и напряжено-деформированного состояния [1]. Этот метод может быть отнесён к технологии автоматического регулирования собираемых соединений и имеет большие возможности повышения точности и увеличения производительности труда [2]. Эффективность метода определяется не столько возможностью совмещения поверхностей сопряжения при погрешностях относительного положения соединяемых деталей, сколько обоснованным и комплексным управлением технологическими размерными связями, возникающими в процессе сборки.

Поскольку различия между процессами достижения точности изготовления деталей и сборки соединений не носят концептуальный характер, проявление действия технологических размерных связей можно отнести к этапам установки деталей на исполнительные поверхности робототехнической системы, статической настройки системы и непосредственно этапа формирования контактных связей между рельефами поверхностей сопряжения соединяемых деталей [2]. В процессе выполнения каждого из этих этапов действуют размерные связи, отклонениями замыкающих звеньев которых необходимо управлять. Рассматривая эти отклонения как результат действия погрешностей составляющих звеньев размерных связей, возможно определить состав задач управления для достижения точности соединений.

При сборке соединений в качестве технологических баз, как правило, выступают основные или вспомогательные базы деталей. Отсюда следует, что главной причиной погрешностей установки являются отклонения относительных поворотов и расстояний основных и вспомогательных баз у каждой из соединяемых деталей. Другой причиной указанных погрешностей, является неорганизованная смена баз из-за существенных отклонений исходного положения деталей в грузочно-накопительных устройствах. Задача управления связями на этапе установки состоит: во-первых, в обеспечении полноты контакта технологических баз деталей с базирующими элементами захватных устройств или позиционных приспособлений (обеспечение определённости базирования), во-вторых – в определении с требуемой точностью пространственного положения поверхностей сопряжения установленных деталей относительно базовой системы координат. Это необходимо для принятия решения о возможности образования из данных деталей соединения с требуемой точностью размерных связей.

Основной причиной образования погрешности статической настройки является ограниченная точность воспроизведения координатных движений в рабочем пространстве из-за упругих деформаций звеньев манипуляционной системы. При перемещениях манипуляторов и изменении их конфигурации происходит перераспределение нагрузки на несущие элементы конструкции, что приводит к изменению упругих деформаций последних. Для сборочных центров мостовой компоновки упруго деформируются направляющие продольного и поперечного перемещения манипуляторов. Прогобы приводят к отклонениям углового положения исполнительных поверхностей манипуляторов. Сокращение погрешности статической настройки возможно путём ограничения упругих деформаций, рациональным планированием движений и оснащением манипуляторов устройствами, позволяющими автоматически корректировать угловое положение исполнительных поверхностей.

С момента первоначального контакта поверхностей сопряжения и до завершения формирования контактных связей выполняется этап динамической настройки. Отличительной особенностью этапа является действие сил и моментов, необходимых для воспроизведения движений смены баз. Замена технологических баз на конструкторские (перебазирование) ставит задачу управления процессом замены размерных связей связями кинематическими [4].

Вторая задача управления на этапе динамической настройки диктуется необходимостью формирования требуемых параметров контактных связей поверхностей сопряжения деталей. Этот процесс можно рассматривать как достижение выходного вектора Y при частично определённых

значениях входного вектора $\langle X, W \rangle$ [6]. Связь $Y = f(X, W)$ может быть представлена в виде изображающей траектории процесса [7]. Вектор X определяется параметрами относительного положения систем координат двух деталей и может быть оценён в каждый момент времени. Измерение составляющих вектора W , характеризующего свойства поверхностей сопряжения деталей (микрogeометрия, волнистость, макрogeометрические отклонения, микротвёрдость, остаточные напряжения и др.), как правило, в производственных условиях затруднено в связи с необходимостью оснащения робототехнической системы сложным, дорогостоящим оборудованием и значительными затратами времени. Невозможность влияния на векторы X и W приводит к необходимости приложения к объекту специальных управляющих воздействий U и реализации связи вида $Y = F(X, U, W)$. Управляющие воздействия создаются системой управления, которая по информации о текущих значениях X реализует зависимость $U = \Phi(X, Y)$, с помощью которой устанавливается необходимое управляющее воздействие на объект. Информация о значениях W в системе управления естественно отсутствует. Если требуемые значения Y при управлении не достигаются, процесс должен быть прекращён, так как дальнейшее его развитие приведёт к образованию дефектного соединения.

Решение задач управления размерными связями должно начинаться с этапа, на котором окончательно достигается требуемая точность соединения [4], т.е. с этапа динамической настройки технологической системы и далее переходить к статической настройке и к началу технологической операции – захвату детали из загрузочно-накопительного устройства и её установке на исполнительные поверхности. Рассмотреть основы алгоритмизации и методику структурно-параметрического синтеза системы управления целесообразно на конкретном примере выполнения продольно-прессового соединения под действием осевой силы.

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА САУ

Применительно к продольно-прессовым соединениям в качестве одного из параметров, составляющих выходной вектор Y , может рассматриваться величина действительного посадочного натяга δ . Посадочный натяг для дискретной модели контактных связей является условной величиной. Но его влияние на основные показатели качества настолько существенно, что сокращение поля рассеяния ω и обеспечение требуемого значения координаты центра группирования $M(x)$ имеет большое значение. Вариации натяга, как в пределах одного соединения, так и в партии приводят к неравномерному распределению удельных давлений посадок и к деформациям деталей. Натяг влияет на прочность соединения, коэффициенты жёсткости и демпфирования, а следовательно, на частотные характеристики. В процессе формирования контактных связей стабилизация действительного натяга обеспечивает выравнивание силового поля трения и повышает точность движения соединяемых деталей.

Проведенные автором исследования показали, что в качестве специальных управляющих воздействий могут использоваться скорость запрессовки и низкочастотные направленные микроколебания [8]. Циклическое многократное деформирование контактных связей под действием переменных тангенциальных сил сопровождается развитием двух ведущих эффектов: эффекта вибрационной линеаризации разрывной характеристики трения и эффекта наклёпа. Благодаря первому эффекту может быть существенно снижена сила запрессовки и её вариации. Наклёп в зависимости от частоты, амплитуды колебаний и длительности воздействия может инициировать два процесса – упрочнения и разупрочнения материала поверхностей сопряжения. В первом случае возможно повышение прочности соединений с малой величиной действительного натяга, во втором случае снижение величины действительного натяга у тугих соединений приводит к уменьшению деформаций деталей.

Величина действительного натяга в значительной степени зависит от скорости запрессовки. При скоростях до $2,0 \times 10^{-3}$ м/с коэффициент трансформации натяга близок к единице. При скорости

$10,0 \times 10^{-3}$ м/с снижение средней величины контактного давления может достигать 35% от расчётного значения. Это открывает достаточные возможности в управлении точностью и прочностью посадок с натягом. Схема формирования контактных связей продольно-прессового соединения показана на рис.1, где F_3 – сила запрессовки, V_M – скорость монтажа, Z_{y1} , Z_{y2} – упругие перемещения технологических баз соединяемых деталей под действием силы запрессовки, m_1 , m_2 – приведенные массы деталей, C_1 , C_2 , K_1 , K_2 – коэффициенты жёсткости и демпфирования. Детали в осевом направлении рассматриваются как абсолютно жёсткие. Взаимодействие поверхностей сопряжения – упругое.

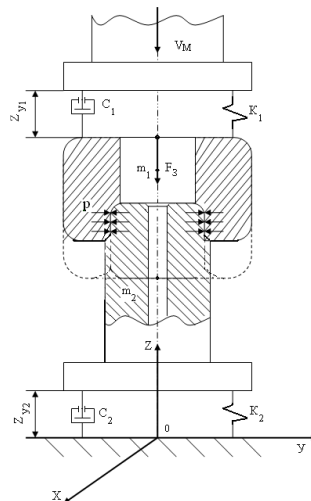


Рис. 1. Схема формирования контактных связей

Rys. 1. Schemat kształtowania kontaktowych relacji

Баланс перемещений представим в виде: $Z_M(t) = Z(t) + Z_{y1}(t) + Z_{y2}(t)$.

Баланс скоростей: $V_M(t) = V_{y1}(t) + V_{y2}(t) + V_\phi(t)$.

Движение формирования контактных связей в соединении представим в виде:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 z_{y1}}{dt^2} + C_1 \frac{dz_{y1}}{dt} + K_1 Z_{y1} = F_3 \\ m_2 \frac{d^2 z_{y2}}{dt^2} + C_2 \frac{dz_{y2}}{dt} + K_2 Z_{y2} = F_3 \end{cases} \quad (1)$$

Уравнения (1) записаны для случая изменения скорости монтажа. Для случая наложения на движение низкочастотных колебаний сила запрессовки может быть определена согласно [8] как:

$$F_{3\omega} = F_3 \cdot e^{-\gamma \frac{4\pi^2 f^2 A}{q}};$$

где γ – коэффициент влияния низкочастотных колебаний на снижение силы запрессовки (определяется экспериментально для партии соединений).

На рис. 2 и рис. 3 показаны полученные экспериментально графики изменения силы запрессовки F_3 соответственно при изменении скорости монтажа и возбуждении в конструкции соединения низкочастотных колебаний.

При использовании в качестве привода электродвигателя постоянного тока, структурная схема объекта управления – «процесс запрессовки - электродвигатель» после ряда преобразований принимает вид представленный на рис. 4.

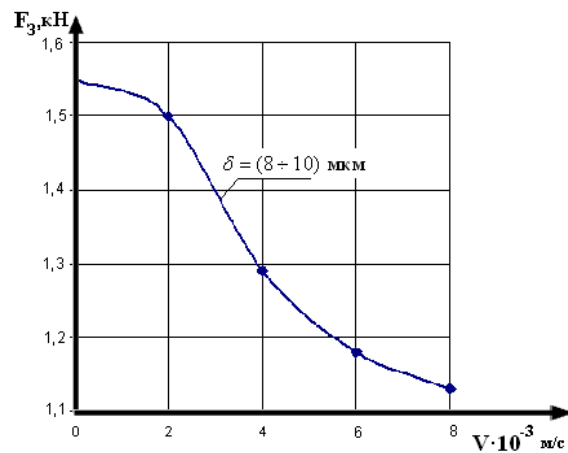


Рис. 2. График изменения силы запрессовки при изменении скорости монтажа

Rys. 2. Wykres zmiany siły wciskania przy zmianie prędkości przemieszczenia

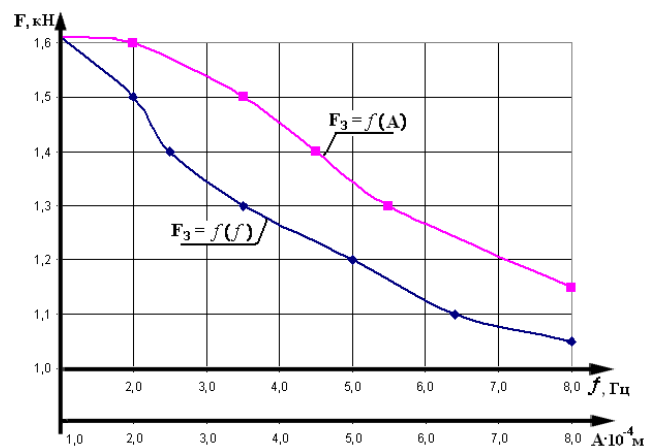


Рис. 3. График изменения силы запрессовки при возбуждении в конструкции соединения низкочастотных колебаний

Rys. 3. Wykres zmiany siły wciskania przy wzbudzeniu w połączeniu niskoczęstotliwościowych drgań

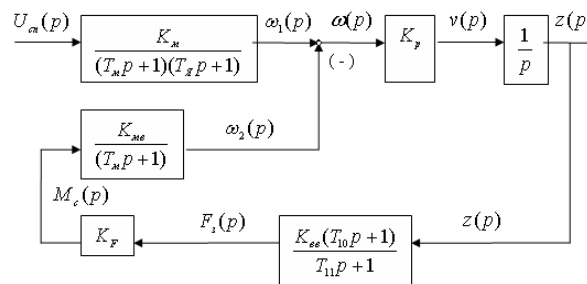


Рис. 4. Структурная схема объекта управления

Rys. 4. Strukturalny schemat obiektu sterowania

Обобщённая структурно-функциональная схема цифровой системы автоматического управления процессом, построенная на основе изложенных выше требований, представлена на рис. 5. Схема включает два взаимодействующих уровня управления. Нижний (исполнительный) уровень, реализующий программное движение монтируемой детали, строится на основе теории систем подчинённого регулирования. Верхний уровень обеспечивает наблюдение за соответствием изображающей траектории протекающего процесса формирования контактных связей его эталонной модели и производит выбор дополнительного управляющего воздействия на объект управления. Сигналы на управляющие воздействия формируются ключами К2.1 и К2.2. С дискретностью T производится последовательное включение каждого из возможных воздействий и оценивается степень отклонения измеренных параметров траектории от их эталонных значений. При отсутствии требуемой реакции объекта на управляющее воздействие процесс прекращается и система приходит в исходное положение. Выходной величиной системы является действительный посадочный натяг $\delta(p)$, наблюдение за формированием которого осуществляется путём измерения силы $F_3(p)$ запрессовки в функции координаты Z перемещения монтируемой детали. Это отражено на схеме в виде звеньев с коэффициентами передачи K_1 и K_2 . Значения указанных коэффициентов могут быть получены путём линеаризации зависимости силы запрессовки F_3 от конструктивных параметров соединения: $f_{TP}, d, L, C_1, C_2, E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$.

Работоспособность системы оценивалась при выполнении операций запрессовки подшипника качения BB1-3065 AE в крышку автомобильного генератора 9402.3701 на сборочном центре МИР-1 конструкции СамГТУ. Измеренный натяг в двух партиях по 100 соединений менялся от $5,0 \times 10^{-6}$ м. до $20,0 \times 10^{-6}$ м. Скорость монтажа регулировалась в диапазоне $(2,0-10,0) \times 10^{-3}$ м/с. Частота колебаний $-5,0-15,0$ Гц, амплитуда $-(100-400) \times 10^{-6}$ м. Величина действительного натяга в соединениях оценивалась по выталкивающей нагрузке F_{BH} - наименьшему значению силы, при которой начинается движение запрессованного в крышку подшипника в направлении противоположном направлению его монтажа. На рис. 6 а, б показаны гистограммы выталкивающей нагрузки F_{BH} для соединений собранных без управления (рис. 6,а) и при управлении (рис. 6, б). Как видно, поле рассеяния $\omega_{F_{BH}}$ в партии соединений уменьшилось на 20-25%, а центр группирования $M(x)$ сместился в направлении более высоких значений. Это указывает на достижение более высокого качества соединений.

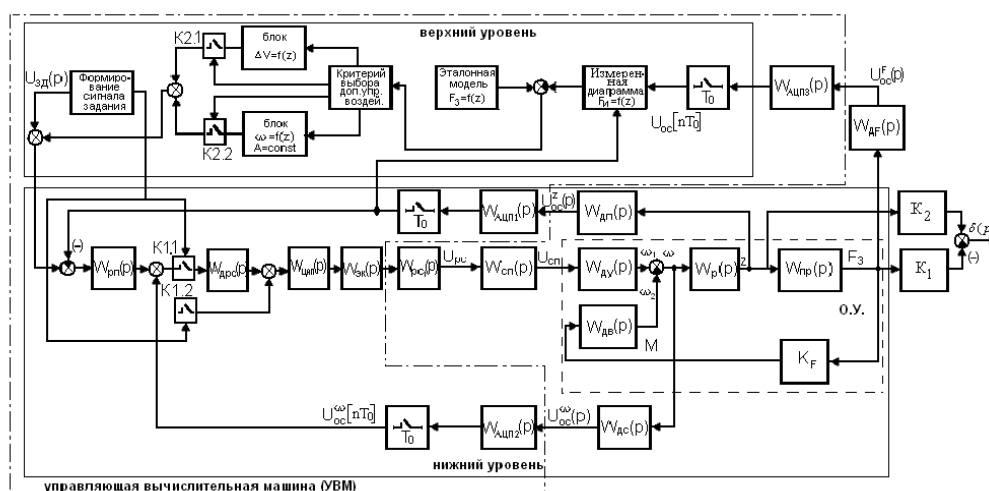


Рис. 5. Обобщенная структурно-функциональная схема цифровой системы управления процессом запрессовки

Rys. 5. Uogólniony schemat funkcjonalno-strukturalnego układu sterowania procesem wciskania

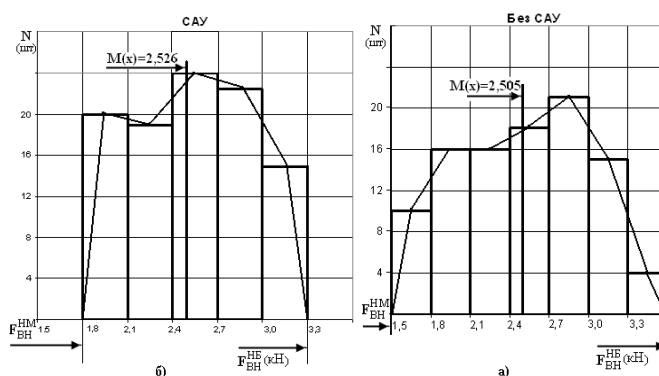


Рис. 6. Гистограммы выталкивающей нагрузки: а – без управления процессом, б – с управлением процессом

Rys. 6. Histogramy sił wyciskania; a) bez sterowania procesem, b) ze sterowaniem procesem

ВЫВОДЫ

1. Показана необходимость рассмотрения процесса достижения точности соединений, как объекта управления, обладающего свойствами изменчивости, динамичности, неполноты описания и целесообразности результата управления.

2. Установлено, что возможность достижения точности соединений определяется строением и свойствами размерных связей действующих на этапах установки, статической и динамической настройки технологической системы. Каждый из этапов вносит свой вклад в достижение точности соединений.

3. Формирование контактных связей между поверхностями сопряжения деталей происходит на этапе динамической настройки, внешним проявлением которого являются действующие в технологической системе силы. Возможность идентификации процесса формирования контактных связей по действующим силам в значительной степени определяется достигнутой точностью пространственного координирования поверхностей сопряжения.

4. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения качества высокоточных продольно-прессовых соединений путём автоматического управления размерными связями на операциях роботизированной сборки соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы обеспечения качества машин/ К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др.; Под общ. Ред. К.С. Колесникова.- М.: Машиностроение, 1990.-256 с.: ил. – (Основы проектирования машин).
2. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения: В 2-х кн.- М.: Машиностроение, 1982. 367 с., ил.
3. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы.- Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988. -332 с.
4. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. Для машиностроит. Спец. Вузов.- 2-е изд., испр. – М.: Высш. Шк., 1999.-591 с. : ил.
5. Сборка и монтаж изделий: Сборник. В 2-х т. / Ред.совет. В.С. Корсаков (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1983. – Т.1. Сборка изделий машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятинба, 1983. – 480 с., ил.
6. Пospelов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика.- М.: Наука.- Гл. Ред. Физ.-мат. Лит., 1986. -288 с.
7. W. Nikołajew, B. Sztrikow: Technologiczne oprzyrządowanie mechatronicznych systemów do montażu połączeń/ Technologia i automatyzacja montażu: NR 1, 2005,-s. 20-23.
8. Гудушаури Э.Г., Пановко Г. Теория вибрационных технологических процессов при некулоном трении. М.: Наука, 1988. – 145 с.

CONTROL OF DIMENSIONAL COUPLING IN ROBOTIZED HIGH-PRECISION ASSEMBLY

Abstract: Technological foundations of control algorithmization of dimensional coupling at stages of assembly precision achievement are considered in this paper. Methodology of automatic control structure and parameter-oriented synthesis has been developed for the touch coupling of the connected parts' joint points. Implementation and results of control over dimensional coupling at the stage of dynamic setting of the technological system when a roller bearing is being installed into the generator cover in the Assembly Centre at the Samara State Technical University are presented here.

L. W. BOŹKOWA
M. W. WARTANOW
Ż. K. BAKENA MBUA
Uniwersytet Techniczny MAMI
Moskwa, Rosja

ZROBOTYZOWANY MONTAŻ WALCOWYCH CZĘŚCI PROFILOWYCH Z POMOCĄ WIBRACJI I PASYWNEJ ADAPTACJI

РОБОТИЗАЦІЯ СБОРКИ ЦИЛІНДРИЧЕСКИХ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ПАСИВНОЙ АДАПТАЦИИ

В данной работе предлагается усовершенствовать конструкцию устройства, примененного для сборки цилиндрических соединений, предложена в работе [1] таким образом, чтобы оно было применимо при сборке профильных цилиндрических деталей, в том числе резьбовых и шлицевых соединениях. С этой целью в вибрационное специализированное устройство добавляется еще одно (третье) звено, совершающее вращательное движение вокруг неподвижной вертикальной оси.

В результате этого, сборочное устройство будет представлять собой трехзвенный манипулятор, каждое звено которого приводится в движение от отдельного привода (Рис. 1).

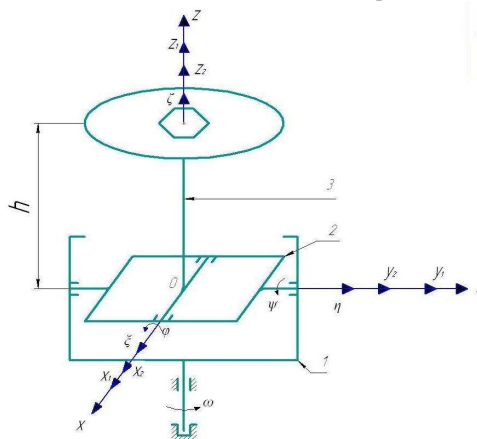


Рис. 1. Кинематическая схема сборочного вибрационного устройства

Rys. 1. Schemat kinematyczny wibracyjnego urządzenia montażowego

Первое звено устройства совершает вращательное движение с постоянной угловой скоростью ω вокруг вертикальной неподвижной оси Oz (система координат $Oxyz$ является неподвижной). Это звено приводится в движение электродвигателем. Второе и третье звенья устройства совершают вибрационные колебания вокруг взаимно перпендикулярных осей Ox_1 и Ox_2 . Система координат $Ox_iy_iz_i$ ($i = 1, 2$) неразрывно связана с первым и вторым звеньями. Эти звенья приводятся в движение электромагнитами. При этом вибрационные колебания вокруг осей Ox_1 и Ox_2 происходят по гармоническим законам.

С третьим звеном жестко связан диск, в центре которого жёстко базируется одна из сопрягаемых деталей. С третьим звеном связана система координат $O\xi\eta\zeta$.

Устанавливаемая деталь имеет упругое базирование в схвате робота, допускающее её упругие перемещения в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям (в направлении осей C_4y_4 и C_4z_4). Система координат $C_4x_4y_4z_4$ жестко связана со схватом, где точка C_4 является центром масс (рис.2).

Рабочими движениями манипулятора робота на этапе сопряжения деталей является поступательное перемещение звена, несущего схват вертикально вниз в запрограммированное положение.

Считаем, что при транспортировке детали к месту монтажа появится погрешность позиционирования, обусловленная наличием упругих связей в схвате.

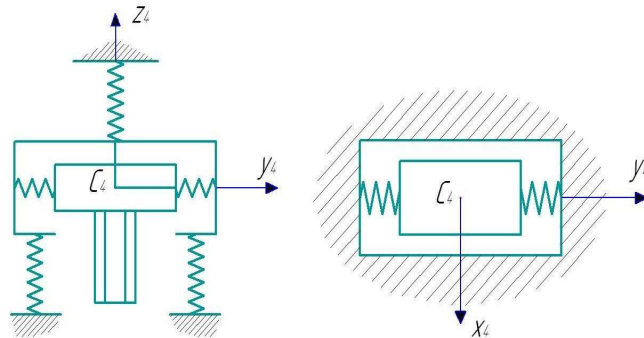


Рис. 2. Кинематическая схема упругого закрепления цилиндрической детали в схвате

Rys. 2. Kinematyczny schemat sprężystego zamocowania walcowej części w uchwycie

При этом устанавливаемая деталь в некоторый момент времени соприкоснется с плоскостью ориентирующего диска (с базовой деталью). Рассмотрим случай, когда первоначальный контакт цилиндрической детали с плоскостью ориентирующего диска произойдет в одной точке «k» (рис. 3).

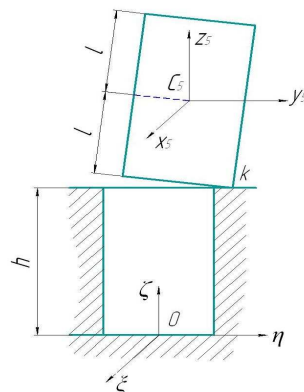


Рис. 3. Кинематическая схема первоначального контакта устанавливаемой детали с плоскостью ориентирующего диска

Rys. 3. Kinematyczny schemat początkowego kontaktu ustawionej części z płaszczyzną orientującej tarczy

Система координат $C_5x_5y_5z_5$ жестко связана с устанавливаемой деталью. Начало координат C_5 совпадает с центром масс детали.

В первом приближении будем предполагать, что угол перекоса осей детали и схвата настолько мал, что им можно пренебречь.

Целью данной работы является изучение влияния законов движения звеньев сборочного устройства, величин амплитуды и круговой частоты вибрационных колебаний, угловой скорости вращения первого звена на характер движения центра масс устанавливаемой детали (а также первоначальной точки контакта деталей) относительно базовой детали, то есть относительно неинерциальной системы координат $O\xi\eta\zeta$. Кроме того, необходимо оценить влияние на это движение конструктивного параметра “h” устройства (рис. 1), коэффициентов жесткости C_1 и C_2 упругих элементов схвата, а также коэффициента трения между устанавливаемой деталью и плоскостью ориентирующего диска.

Построена математическая модель динамики относительного движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к неинерциальной системе координат $O\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью.

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс устанавливаемой детали в форме второго закона Ньютона имеет вид [2]:

$$m\vec{a}_{cr} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{TP} + \vec{F}^{yn} + \vec{F}_{ce}^{un} + \vec{F}_{ck}^{un} + \vec{F}, \quad (1)$$

где: m – масса устанавливаемой детали, \vec{a}_{cr} – абсолютное ускорение центра масс устанавливаемой детали относительно неинерциальной системы координат, \vec{g} – ускорение свободного падения, \vec{N} и \vec{F}_{TP} – соответственно нормальная реакция и сила трения, действующие в точке контакта «К» собираемых деталей, \vec{F}^{yn} – равнодействующая упругих сил в схвате, \vec{F} – сборочное усилие, развиваемое приводом робота, \vec{F}_{ce}^{un} – переносная сила инерции, \vec{F}_{ck}^{un} – кориолисова сила инерции.

Проецируя правую и левую части соотношения (1) на оси координат системы $O\xi\eta\zeta$ и учитывая при этом (2), получим систему дифференциальных уравнений относительного движения центра масс устанавливаемой детали в декартовых координатах:

$$\begin{cases} m\ddot{\xi}_c = (m\vec{g})_{\xi} + F_{TP\xi} + F_{\xi}^{yn} + F_{ce\xi}^{un} + F_{ck\xi}^{un} + P_{\xi}, \\ m\ddot{\eta}_c = (m\vec{g})_{\eta} + F_{TP\eta} + F_{\eta}^{yn} + F_{ce\eta}^{un} + F_{ck\eta}^{un} + P_{\eta}, \\ m\ddot{\zeta}_c = (m\vec{g})_{\zeta} + F_{\zeta}^{yn} + F_{ce\zeta}^{un} + F_{ck\zeta}^{un} + N + P_{\zeta}. \end{cases} \quad (3)$$

Для определения проекций всех сил на оси координат $O\xi\eta\zeta$ применим аппарат матриц преобразования однородных координат [3].

Положение системы координат $Ox_1y_1z_1$ (первого звена устройства) относительно неподвижной системы координат $Oxyz$ определяет матрица $[A_1]$:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где угол $\theta = \omega \times t$.

Положение второго звена (системы координат $Ox_2y_2z_2$) относительно первого звена (системы координат $Ox_1y_1z_1$) задаёт матрица $[A_2]$:

$$[A_2] = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Положение базовой детали (системы координат $O\xi\eta\zeta$) относительно второго звена (системы $Ox_2y_2z_2$) задаёт матрица $[A_3]$:

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Матрицу $[B]$, задающую положения системы координат $O\xi\eta\zeta$ относительно неподвижной системы $Oxyz$, можно построить по формуле:

$$[B] = [A_1] \cdot [A_2] \cdot [A_3], \quad (7)$$

Матрица $[B]^{-1}$ (обратная матрица $[B]$) задаёт положение системы координат $Oxyz$ относительно $O\xi\eta\zeta$.

Положение системы координат $C_4x_4y_4z_4$, жестко связанной со схватом, относительно неподвижной системы координат $Oxyz$ определяет матрица $[A_4]$.

$$[A_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где z_{C_4} – запрограммированное значение координаты Z центра масс схвата (точка C_4) в неподвижной системе координат в конце транспортировки детали к месту монтажа.

Положение устанавливаемой детали (система координат $C_5x_5y_5z_5$) по отношению к схвату (системе координат $C_4x_4y_4z_4$) задаёт матрица $[A_5]$.

$$[A_5] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{C_5}^{(4)} \\ 0 & 0 & 1 & z_{C_5}^{(4)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $y_{C_5}^{(4)}$ и $z_{C_5}^{(4)}$ – соответствующие координаты центра масс устанавливаемой детали по отношению к системе координат $C_4x_4y_4z_4$.

Для упрощения будем считать, что в положении равновесия устанавливаемой детали системы координат $C_4x_4y_4z_4$ и $C_5x_5y_5z_5$ совпадают. При этом растяжение или сжатие упругих элементов в схвате, отсчитываемые от положения равновесия в направлении координатных осей C_4y_4 и C_4z_4 будут соответственно равны $y_{C5}^{(4)}$ и $z_{C5}^{(4)}$.

На основании выше приведенных результатов можно построить матрицу $[B_{cx}]$, задающую положение системы координат $C_4x_4y_4z_4$, (схвата) относительно системы координат $O\xi\eta\zeta$:

$$[B_{cx}] = [B]^{-1} \cdot [A_4], \quad (10)$$

В свою очередь матрицу $[B_g]$, задающую положение системы координат $C_5x_5y_5z_5$ (устанавливаемой детали) относительно системы $O\xi\eta\zeta$ (базовой детали), можно построить на основании следующей формулы:

$$[B_g] = [B_{cx}] \cdot [A_5] \quad (11)$$

Между проекциями упругих сил в схвате на направления осей систем координат $C_4x_4y_4z_4$ и $O\xi\eta\zeta$ существует следующая зависимость:

$$\begin{Bmatrix} F_{\xi}^{yn} \\ F_{\eta}^{yn} \\ F_{\zeta}^{yn} \end{Bmatrix} = [l_{cx}] \begin{Bmatrix} F_{x4}^{yn} \\ F_{y4}^{yn} \\ F_{z4}^{yn} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

где $[l_{cx}]$ - подматрица направляющих конусов матрицы $[B_{cx}]$, определяемой по (11).

Для определения проекций силы трения $(\overline{F_{mp}})$ на оси системы координат $O\xi\eta\zeta$ необходимо найти скорость точки касания устанавливаемой детали с плоскостью ориентирующего диска (точки "К") по отношению к системе координат $O\xi\eta\zeta$. Это объясняется тем, что сила трения направлена противоположно скорости точки "К", так как $\overline{F_{mp}}$ направлена противоположно скорости этой точки.

Координаты точки "К" в системе координат $O\xi\eta\zeta$ можно найти по формуле:

$$\begin{Bmatrix} \xi_k \\ \eta_k \\ \zeta_k \\ 1 \end{Bmatrix} = [B_g] \begin{Bmatrix} 0 \\ r \\ -l \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

где $[B_g]$ определяется на основе (12).

В результате на основе (17) получим:

$$\begin{cases} \xi_k = r \sin \theta \cos \psi + l \sin \psi + \xi_c, \\ \eta_k = r(\sin \theta \sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi) - l \cos \psi \sin \varphi + \eta_c, \\ \zeta_k = r(\sin \theta \sin \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi) - l \cos \psi \cos \varphi + \zeta_c \end{cases} \quad (14)$$

При этом $\ddot{\xi}_c$ нетрудно найти на основе третьего уравнения системы уравнений (17) учитывая, что в случае наличия контакта собираемых деталей $\zeta_k = h$.

Таким образом, математическая модель динамики относительного движения центра масс устанавливаемой детали относительно неинерциальной системы координат $O\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью, представлена в виде:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= p \sin \psi - c(\xi_c + Z_{c4} \sin \psi) - fN \frac{\dot{\xi}_k}{\sqrt{\xi_k^2 + \eta_k^2}} + \phi_1(t), \\ m\ddot{\eta}_c &= -p \cos \psi \sin \varphi - c(\eta_c - Z_{c3} \cos \psi \sin \varphi) - fN \frac{\dot{\eta}_k}{\sqrt{\xi_k^2 + \eta_k^2}} + \phi_2(t). \end{aligned} \quad (15)$$

где:

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &= m(\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \dot{\psi} \sin \varphi - 2\eta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \varphi - \\ &\quad - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \sin \varphi - \zeta_c \ddot{\psi} \cos \varphi + 2\zeta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \varphi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \cos \varphi \cos \psi + \\ &\quad \xi_c \omega^2 \cos^2 \varphi + \eta_c \omega^2 \sin \psi \sin \varphi \cos \psi + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \varphi \cos \psi) - \\ &\quad - 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + \\ &\quad + 2m\dot{\eta}_c(-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi); \\ \phi_2(t) &= m(\xi_c \dot{\psi} \sin \varphi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin^2 \varphi + \eta_c \dot{\phi}^2 - \\ &\quad - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \sin \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos \varphi \cos \varphi + \\ &\quad + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \psi \sin \varphi + \zeta_c \ddot{\phi} + \eta_c \omega^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \\ &\quad + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \cos \varphi) - \\ &\quad - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \cos^2 \varphi + \\ &\quad + \eta_c \omega^2 \cos^2 \varphi - \zeta_c \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi) - 2m\dot{\xi}_c(-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi) + \\ &\quad + 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\phi} - \omega \sin \psi) \end{aligned} \quad (16)$$

При этом нормальная реакция N плоскости ориентирующего диска определяется по формуле:

$$\begin{aligned} N &= M\ddot{\xi}_c + c(\zeta_c - z_{c4} \cos \psi \cos \varphi) - m(\xi_c \omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \varphi + \\ &\quad + \eta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi - \eta_c \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \cos^2 \varphi + \\ &\quad + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \varphi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \sin \psi + \xi_c \ddot{\psi} \cos \varphi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin \varphi \cos \varphi - \\ &\quad - \eta_c \ddot{\phi} + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos^2 \varphi + \zeta_c \dot{\phi}^2 - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \sin \varphi + \\ &\quad + 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin^2 \varphi + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi) + 2m\dot{\eta}_c(\dot{\phi} - \omega \sin \psi) - \\ &\quad - 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + p \cos \psi \cos \varphi. \end{aligned} \quad (17)$$

В момент отрыва устанавливаемой детали от плоскости ориентирующего диска нормальная реакция (N) и сила трения ($\vec{F}_{тр}$) равны нулю.

При этом дифференциальные уравнения относительного движения центра масс устанавливаемой детали (при отсутствии ее контакта с плоскостью ориентирующего диска) имеет вид:

$$\begin{aligned}
m\ddot{\xi}_c &= -c(\xi_c + Z_{c4}\sin\psi) + p\sin\psi + \phi_1(t), \\
m\ddot{\eta}_c &= -c(\eta_c + Z_{c4}\cos\psi\sin\varphi) - p\cos\psi\sin\varphi + \phi_2(t), \\
m\ddot{\zeta}_c &= -c(\zeta_c + Z_{c4}\cos\psi\cos\varphi) - p\cos\psi\cos\varphi + \phi_3(t),
\end{aligned} \tag{18}$$

где

$$\begin{aligned}
\phi_3(t) = m[& \xi_c\omega^2\cos\psi\sin\psi\cos\varphi + \eta_c\omega^2\sin^2\psi\sin\varphi\cos\varphi - \\
& - \eta_c\omega^2\sin\varphi\cos\varphi + \zeta_c\omega^2\sin^2\psi\cos^2\varphi + \zeta_c\omega^2\sin^2\varphi - \\
& - 2\zeta_c\omega\dot{\varphi}\sin\psi + \xi_c\ddot{\psi}\cos\varphi + \eta_c\dot{\psi}^2\sin\varphi\cos\varphi - \\
& - \eta_c\ddot{\psi} + \zeta_c\dot{\psi}^2\cos^2\varphi + \zeta_c\dot{\varphi}^2 - \\
& - 2\xi_c\omega\dot{\psi}\sin\psi\sin\varphi + 2\eta_c\omega\dot{\psi}\cos\psi\sin^2\varphi + \\
& + 2\zeta_c\omega\dot{\psi}\cos\psi\sin\varphi\cos\varphi] - 2m\dot{\eta}_c(\dot{\varphi} - \omega\sin\psi) + \\
& + 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi}\cos\varphi + \omega\cos\psi\sin\varphi).
\end{aligned} \tag{19}$$

Построенная математическая модель динамики относительного движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к подвижной базовой детали реализована на компьютере.

На рис. 4 показана траектория движения центра масс устанавливаемой детали по плоскости ориентирующего диска при следующих значениях перечисленных выше параметров:

$$\omega = 1 \text{ рад/мин}, A = 0,05 \quad k = 42\text{с}^{-1} \quad f = 0,4 \quad h = 0,04\text{м} \quad C = 60\text{н/м}$$

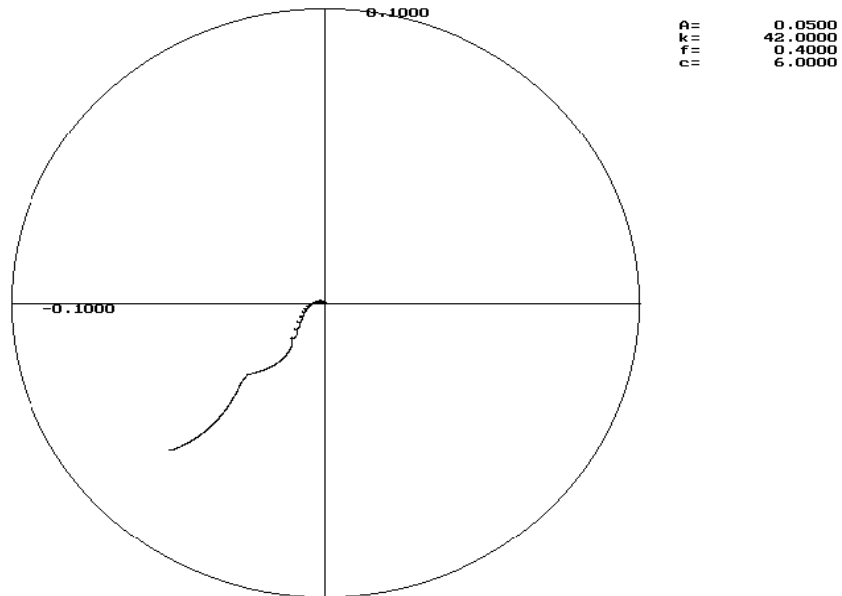


Рис. 4. Траектория движения центра масс устанавливаемой детали по плоскости ориентирующего диска

Rys. 4. Trajektoria ruchu środka ciężkości ustawianej części w płaszczyźnie orientującej tarczy

Анализ результатов численного решения рассматриваемой задачи показал, что существует области изменения основных динамических и конструктивных параметров, при которых центр масс достаточно быстро приближается к оси базовой детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Божкова Л.В, Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний // «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2006, № 9, с. 19-24.
2. Добронравов В.В, Никитин М.Н. Курс теоретической механики – М., «Высшая школа», 1983.- 575с.
3. Коловский М.В, Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. – М.: Наука, 1980.- 240с.

ROBOTIC ASSEMBLY PROFILES CYLINDRICAL PARTS USING VIBRATORY OSCILLATIONS AND PASSIVE ADAPTATION

Abstract. The mathematical model for robotic assembly profile cylindrical details with passive adaptive grip and vibration is represented.

Włodimir TIMIRIAZEW

Denis GOŁOŁOBOW

Aleksander KOSTENKO

Uniwersytet Technologiczny STANKIN

Moskwa, Rosja

WYZNACZANIE DOKŁADNOŚCI POŁĄCZEŃ PRZY BAZOWANIU WEDŁUG TRZECH PŁASZCZYZN

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ БАЗИРОВАНИИ ПО ТРЕМ ПЛОСКОСТЯМ

В тех случаях, когда приближенные методы расчета не позволяют достоверно оценить погрешность установки, целесообразно использовать аналитические методы теории баз [1].

Согласно теории баз погрешность установки характеризует вектор $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$, составляющие которого a_y, b_y, c_y – параметры смещения и $\lambda_y, \beta_y, \gamma_y$ – параметры поворота) определяют отклонение координатной системы (X, Y, Z) технологических баз устанавливаемой заготовки относительно системы координат (x, y, z) базовых поверхностей приспособления.

Отклонение обрабатываемой поверхности заготовки $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ от требуемого положения в направлении размера, получаемого от соответствующей технологической базы, проявляется как приведенная погрешность установки. Она зависит как от составляющих вектора ω_y , так и от положения этой поверхности относительно технологических баз заготовки.

Каждой из трех типовых схем базирования соответствует определенный комплект технологических баз, состоящий из трех базирующих поверхностей.

Так как каждой из базирующих поверхностей соответствует определенная координатная плоскость, то операционные размеры, получаемые от соответствующих баз и их отклонения $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$, имеют направления соответствующих координатных осей.

При базировании по трем плоскостям $T = (\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta y_4, \Delta y_5, \Delta x_6)$ отклонения размера установки, формируемые в направлении технологических баз составляют:

- в направлении нормали к установочной базе

$$\epsilon_z^{(уст)} = c_y^{(уст)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot y + \beta_y^{(уст)} \cdot x; \quad (1)$$

- в направлении нормали к направляющей базе

$$\epsilon_y^{(нан)} = b_y^{(нан)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(нан)} \cdot x; \quad (2)$$

- в направлении нормали к опорной базе

$$\epsilon_x^{(он)} = a_y^{(он)} + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(нан)} \cdot x, \quad (3)$$

где $c_y^{(уст)}, \lambda_y^{(уст)}, \beta_y^{(уст)}$ – составляющие вектора погрешности установки ω_y , формируемые на установочной базе;

$b_y^{(нан)}, \gamma_y^{(нан)}$ – составляющие вектора ω_y , формируемые на направляющей базе;

$a_y^{(он)}$ – параметр смещения, формируемый на опорной базе.

При базировании заготовки по конструктивно оформленным опорным элементам параметр смещения $c_y^{(уст)}$, формируемый на установочной базе составляет

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot h, \quad (4)$$

где h – погрешность формы поверхности установочной базы.

Погрешность формы h (отклонения от плоскостности, прямолинейности и параллельности) регламентируется (ГОСТ 24643-81) с учетом допуска на размер между рассматриваемыми поверхностями и уровня относительной геометрической точности А, В, С. Это позволяет по таблицам [8] определить необходимые для расчета численные значения отклонений. В общем случае отклонения формы h можно определить как часть допуска IT на размер между рассматриваемыми поверхностями:

$$h = k \cdot IT, \quad (5)$$

где k – коэффициент, определяющий соотношение h/IT .

В соответствии с рекомендациями ГОСТ по определению уровня относительной геометрической точности плоских поверхностей деталей коэффициент k имеет следующие оценочные значения:

Относительная геометрическая точность поверхностей деталей		
нормальная (группа А)	повышенная (группа В)	высокая (группа С)
$\frac{h}{IT} \cdot 100 = 60\%$	$\frac{h}{IT} \cdot 100 = 40\%$	$\frac{h}{IT} \cdot 100 \leq 25\%$
$k = 0,6$	$k = 0,4$	$k = 0,25$

Таким образом, в общем случае отклонение формы поверхности h , определяемое как часть допуска IT на размер, координирующий данную плоскость, можно оценить коэффициентом k , который может принимать следующие значения:

Относительная геометрическая точность поверхности	Соотношение отклонения формы h и допуска IT на размер	Значения коэффициента k ,
нормальная (группа А)	$0,4 \cdot IT < h \leq 0,6 \cdot IT$;	$0,4 < k \leq 0,6$
повышенная (группа В)	$0,4 \cdot IT \geq h > 0,25 \cdot IT$;	$0,4 \geq k > 0,25$
высокая (группа С)	$h \leq 0,25 \cdot IT$.	$k \leq 0,25$

С учетом (5) выражение (4) можно записать:

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot k \cdot IT. \quad (6)$$

В соответствии с (6) параметры смещения $c_y^{(уст)}$, формируемые на установочной базе, можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность установочной базовой поверхности		
нормальная (группа А), $k = 0,6$	повышенная (группа В) $k = 0,4$	высокая (группа С) $k = 0,25$
$c_y^{(yсм)} = 0,3 \cdot IT$	$c_y^{(yсм)} = 0,2 \cdot IT$	$c_y^{(yсм)} = 0,12 \cdot IT$

Параметры относительного поворота $\lambda_y^{(yсм)}, \beta_y^{(yсм)}$ формируемые по установочной базе, соответственно составляют:

$$\lambda_y^{(yсм)} = \frac{h}{4L_y}; \quad (7)$$

$$\beta_y^{(yсм)} = \frac{h}{4L_x}, \quad (8)$$

где L_y и L_x – расстояния между опорными элементами установочной базы в направлении осей Y и X .

С учетом (5) выражение (7), (8) принимают вид:

$$\lambda_y^{(yсм)} = \frac{h \cdot k \cdot IT}{4L_y} \quad (9)$$

$$\beta_y^{(yсм)} = \frac{h \cdot k \cdot IT}{4L_x} \quad (10)$$

Согласно (9), (10) параметры поворота $\lambda_y^{(yсм)}, \beta_y^{(yсм)}$, формируемые на установочной базе различной геометрической точности, можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность установочной базы		
нормальная (группа А), $k = 0,6$	повышенная (группа В) $k = 0,4$	высокая (группа С) $k = 0,25$
$\lambda_y^{(yсм)} = \frac{0,15 \cdot IT}{L_y}$	$\lambda_y^{(yсм)} = \frac{0,1 \cdot IT}{L_y}$	$\lambda_y^{(yсм)} = \frac{0,03 \cdot IT}{L_y}$
$\beta_y^{(yсм)} = \frac{0,15 \cdot IT}{L_x}$	$\beta_y^{(yсм)} = \frac{0,1 \cdot IT}{L_x}$	$\beta_y^{(yсм)} = \frac{0,03 \cdot IT}{L_x}$

Величина смещения $b_y^{(nan)}$, формируемая на направляющей базе, зависит от погрешности геометрической формы h направляющей базы и от перпендикулярности направляющей базы относительно установочной. С учетом вероятностного характера проявления этих отклонений имеем:

$$b_y^{(nan)} = 0,5 \cdot \sqrt{h^2 + (IT_v \cdot Z)^2}, \quad (11)$$

где Z – расстояние от установочной базы до опорных элементов направляющей базы;

IT_v – допуск, ограничивающий отклонения от перпендикулярности направляющей базы относительно установочной.

Представив погрешность геометрической формы h как часть допуска IT на размер, ограничиваемый поверхностью направляющей базы получим:

$$b_y^{(nap)} = 0,5 \cdot \sqrt{(k \cdot IT)^2 + (IT_v \cdot Z)^2} . \quad (12)$$

Параметр поворота $\gamma_y^{(nap)}$, формируемый на направляющей базе:

$$\gamma_y^{(nap)} = \frac{h}{4L_n} \quad \text{и с учетом (5) имеем} \quad \gamma_y^{(nap)} = \frac{k \cdot IT}{4L_n} , \quad (13)$$

где L_n – расстояние между опорными элементами направляющей базы.

Для базирующих поверхностей различной геометрической точности отклонения поворота $\gamma_y^{(nap)}$, можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность деталей		
нормальная (группа А), $k = 0,6$	повышенная (группа В) $k = 0,4$	высокая (группа С) $k = 0,25$
$\gamma_y^{(nap)} = \frac{0,15 \cdot IT}{L_n}$	$\gamma_y^{(nap)} = \frac{0,1 \cdot IT}{L_n}$	$\gamma_y^{(nap)} = \frac{0,03 \cdot IT}{L_n}$

Параметр смещения $a_y^{(on)}$, формируемый на опорной базе, зависит от геометрической формы h и погрешности поворота поверхности опорной базы относительно установочной IT_μ и направляющей IT_ϕ баз:

$$a_y^{(on)} = 0,5 \cdot \sqrt{h^2 + (IT_\mu \cdot L_y)^2 + (IT_\phi \cdot L_n)^2} , \quad (14)$$

где L_y , L_n – расстояния от опорной точки до установочной и направляющей баз.

С учетом выражения (5) формула (14) принимает вид:

$$a_y^{(on)} = 0,5 \cdot \sqrt{(k \cdot IT)^2 + (IT_\mu \cdot L_y)^2 + (IT_\phi \cdot L_n)^2} . \quad (15)$$

Таким образом, приведенные зависимости позволяют рассчитать отклонения размеров, формируемых при соединении деталей по установочной, направляющей и опорной базам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование технологии. Под. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 415 с.

CALCULATION OF ACCURACY OF CONNECTION OF DETAILS AT BASING ON THREE PLANES

Abstract: In article questions of modelling of accuracy of connection of details are considered at their basing in assembly unit on three planes.

Włodimir TIMIRIAZEW

Anna GOŁOŁOBOWA

Aleksander SZAGAŁKIN

Uniwersytet Technologiczny STANKIN

Moskwa, Rosja

ZAPEWNIENIE DOKŁADNOŚCI POŁĄCZEŃ Z POMOCĄ GRUPOWEJ SELEKCJI

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППОВОЙ
ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка) применяют для достижения высокой точности соединения в малозвенных размерных цепях. Его сущность заключается в том, что требуемая точность соединения - зазора или натяга достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев (деталей), принадлежащих к одной из групп, на которые детали были предварительно рассортированы. Требуемая величина зазора или натяга в соединении формализуется как замыкающее звено соответствующей размерной цепи, точность которого определяется допуском T_{Δ} .

В начале задачу пытаются решить с использованием метода полной взаимозаменяемости и находят средний допуск T_{cp} для деталей соединения:

$$T_{cp} = \frac{T_{\Delta}}{m-1}$$

где m – число звеньев в рассматриваемом соединении.

Если полученный допуск T_{cp} оказывается по величине труднодостижимым (жестким), то его увеличивают в n раз:

$$T'_{cp} = n T_{cp}$$

где n – предполагаемое число групп сортировки.

В результате получаем расширенный средний допуск T'_{cp} , ориентируясь на который назначают расширенные допуски T'_i на детали соединения. При этом величина T'_i должна быть кратна числу групп n , что позволяет осуществить корректное разбиение деталей соединения на группы.

Реализация метода групповой взаимозаменяемости по данной схеме предусматривает также выполнение двух расчетных условий:

Условие 1 - сумма допусков увеличивающих звеньев должна равняться сумме допусков уменьшающих:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \tilde{T}'_i = \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \tilde{T}'_i$$

где k – число увеличивающих звеньев размерной цепи.

Условие 2 - координата середины поля допуска, получаемая на замыкающем звене при расширенных допусках Δ'_{Δ} , должна быть равна требуемой координате середины поля допуска:

$$\Delta'_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta'_{0i} - \sum_{i=k}^{i=m-1} \Delta'_{0i} = \Delta_{0i} \cdot$$

Эффективная реализация этого метода, при которой имеет место наименьшее число некомплектных деталей соединения достигается при выполнении двух технологических условий:

1. Допуски на составляющие звенья, ограничивающие относительный поворот, отклонения формы и шероховатость поверхностей деталей, должны соответствовать не расширенным допускам T'_i , а устанавливаться в соответствии с численными значениями групповых допусков T'_i/n .

2. Обеспечение идентичности законов рассеяния отклонений на составляющих звеньях. Данное условие непосредственно вытекает из необходимости получения комплектности деталей соединения. Не выполнение этого условия приводит к тому, что в одинаковых группах оказывается различное число деталей.

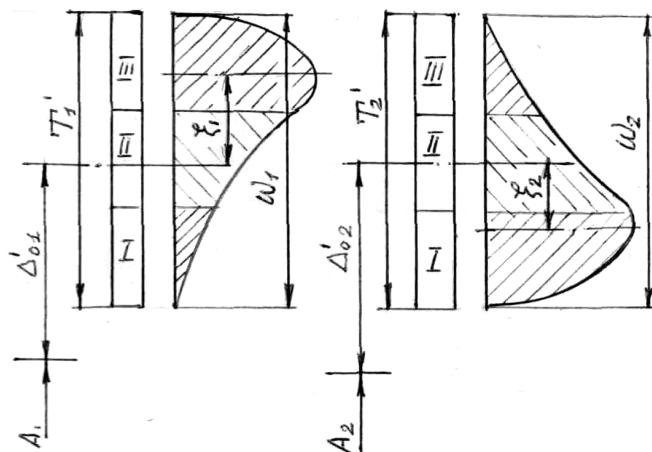


Рис.1

Rys. 1. Przykłady przesunięcia środka pola rozrzutu względem środka pola tolerancji dwóch łączonych części

На рис. 1 наглядно показано, что различные смещения центра группирования отклонений относительно середины поля допуска у двух соединяемых деталей $\xi_1 \neq \xi_2$ приводят к формированию разного числа деталей в группах I и III. В результате в этих двух группах остается большое число некомплектных (невостребованных) деталей. Идентичность законов рассеяния отклонений на составляющих звеньях достигают путем правильной настройки станков при изготовлении комплектующих деталей соединения.

В результате выполненного расчета составляют таблицу сортировки деталей по группам размеров, которая в общем случае имеет вид:

Звенья цепи

	A_1		A_2		...	A_{m-1}	
	Δ_1^g	Δ_1^H	Δ_2^g	Δ_2^H	...	$\Delta_{(m-1)}^g$	$\Delta_{(m-1)}^H$
I груп.	$\Delta_{1,1}^g$	$\Delta_{1,1}^H$	$\Delta_{2,1}^g$	$\Delta_{2,1}^H$	...	$\Delta_{(m-1),1}^g$	$\Delta_{(m-1),1}^H$
II груп.	$\Delta_{1,II}^g$	$\Delta_{1,II}^H$	$\Delta_{2,II}^g$	$\Delta_{2,II}^H$	...	$\Delta_{(m-1),II}^g$	$\Delta_{(m-1),II}^H$
J. . .	...	...	...	...	...	...	...
n груп.	$\Delta_{1,n}^g$	$\Delta_{1,n}^H$	$\Delta_{2,n}^g$	$\Delta_{2,n}^H$	...	$\Delta_{(m-1),n}^g$	$\Delta_{(m-1),n}^H$

По горизонтали располагают звенья цепи, а по вертикали для каждого звена располагают рассчитанные предельные отклонения, относящиеся к каждой из групп.

При сборке изделий с использованием метода групповой взаимозаменяемости соединение деталей, принадлежащих к одной группе, обеспечивает достижение точности замыкающего звена по полной взаимозаменяемости, а при рассмотрении всех групп имеет место групповая взаимозаменяемость.

В соответствии с этим, для проверки правильности разбиения расширенных допусков T'_i на группы и проверки правильности назначения предельных отклонений в каждой из групп, можно использовать формулы предельных отклонений, которые в общем случае для всех n групп имеют вид:

$$\Delta_{\Delta}^6 = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{ij}^6 - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{ij}^6 ; \quad \Delta_{\Delta}^H = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{ij}^H - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{ij}^H ,$$

где j – номер соответствующей группы сортировки, $j = (1 \dots n)$.

Применение метода групповой взаимозаменяемости (селективной сборки) в многозвенных цепях требует выполнения большого объема работ, связанных с измерением деталей соединения и их сортировкой, что значительно снижает его эффективность. Поэтому этот метод групповой взаимозаменяемости обычно применяют в 3-х и 4-х звенных размерных цепях, т.е. в соединениях с малым числом комплектующих деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения. Под. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 1999. – 415 с.

MAINTENANCE OF ACCURACY OF CONNECTION WITH USE OF GROUP INTERCHANGEABILITY

Abstract: In article the design procedure of accuracy mobile connections with use of a method of group interchangeability is considered.

Mark KRISTAL
Uniwersytet Techniczny
Wołgograd, Rosja

NOWA POSTAĆ ROZKŁADÓW W ZADANIACH ZWIĘKSZANIA
NIEZAWODNOŚCI AUTOMATÓW MONTAŻOWYCH

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЯ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ СБОРОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Одной из наиболее сложных проблем внедрения сборочных автоматов является их недостаточно высокая надежность. При этом следует дифференцировать надежность выполнения собственно сборочной операции, зависящей от точности взаимного расположения деталей на рабочей позиции или в зоне сборки (для вибротранспортных непрерывных сборочных устройств (НСУ)), от надежности бесперебойного снабжения рабочих позиций деталями сборочного комплекта. Если вопросы точности относительного расположения деталей на стационарных позициях дискретных сборочных автоматов решают на основе анализа объемных размерных цепей, то для НСУ вибротранспортного типа [1] требуется иной подход.

Для обеспечения бесперебойного снабжения рабочих позиций технологических машин создают буферные накопители необходимого объема V , компенсирующие случайный характер, входного в накопитель и выходного из него потоков деталей. Известные методы расчета величины объема V , основанные на цепях Маркова, предполагают, что эти потоки, разной интенсивности, являются простейшими. Такой подход, во-первых, не всегда соответствует реальным процессам, а во-вторых, дает завышенные значения объема V .

Автором предложено новое распределение случайной величины (распределение Кристалля) [2], представляющую собой разность \dot{i} – тых случайных величин t_i , имеющих распределение Эрланга:

$$f_i(t_i) = (k_i \lambda_i)^{k_i} t_i^{k_i-1} \exp(-k_i \lambda_i t_i) / (k_i - 1)!. \quad (1)$$

где $k_i \in [1, 2 \dots n]$ – коэффициент последствия, принимающий целочисленные значения и характеризующий степень стохастичности потока; λ_i – средняя интенсивность (производительность) потока; i – индекс потока: для входного $i = 1$ и для выходного потоков – $i = 2$.

Плотность $f(t)$ вероятности распределения Кристалля имеет вид:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{A \exp(k_2 \lambda_2 t) (k_2 - 1)!}{b^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_2-1} \frac{(-tb)^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_2 - i - 1)! i!}, & \text{при } t < 0; \\ \frac{A \exp(-k_1 \lambda_1 t) (k_1 - 1)!}{b^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{(tb)^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_1 - i - 1)! i!}, & \text{при } t > 0; \end{cases} \quad (2)$$

где $A = \frac{(k_1 \lambda_1)^{k_1} (k_2 \lambda_2)^{k_2}}{(k_1 - 1)! (k_2 - 1)!}$; $b = k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2$.

Основными характеристиками распределения Кристалля являются математическое ожидание $M(t) = (\lambda_1)^{-1} - (\lambda_2)^{-1}$; дисперсия $D(t) = (k_1 \lambda_1^2)^{-1} + (k_2 \lambda_2^2)^{-1}$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)} = \sqrt{(k_1 \lambda_1^2)^{-1} + (k_2 \lambda_2^2)^{-1}}$.

Функция $f(t)$ позволяет оценить вероятность выполнения сборки деталей, движущихся в зоне сборки сборочной позиции двумя случайными потоками. Поскольку при преобразовании случайной величины t временного смещения сопрягаемых поверхностей в случайную погрешность относительного расположения X этих поверхностей, эта величина существенно превышает величину радиального зазора S соединения, то вероятность сборки можно вычислить по выражению:

$$P_c^B = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(c/a)^n (1+c/a)^{i+1-m-n} (m+n-i-2)!}{(m-i-1)!(n-1)!} [1 - \exp(-a) \sum_{j=0}^i a^j / j!] + \\ + \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(a/c)^m (1+a/c)^{i+1-m-n} (m+n-i-2)!}{(n-i-1)!(m-1)!} [1 - \exp(-c) \sum_{j=0}^i c^j / j!], \quad (3)$$

где $a = \lambda^* m$; $c = a \varepsilon \nu$; $x^* = x / E_S$; λ^* - коэффициент заполнения потока зазоров; $\varepsilon = \gamma_1 / \gamma_2$ - отношение интенсивностей потоков сопрягаемых деталей; $\nu = n / m$; E_S - математическое ожидание радиального зазора соединения.

Поскольку наибольшего значения вероятность P_c^B достигает, если параметры $\varepsilon = \nu = 1,0$, т.е. при условии равенства интенсивностей $\gamma_1 = \gamma_2$ и параметров $m = n$, учитывающих степень последствия потоков деталей, проходящих через ЗС. В этом случае выражение (3) примет вид:

$$P_c^B = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(c/a)^n (1+c/a)^{i+1-m-n} (2m-i-2)!}{(m-i-1)!(m-1)!} [1 - \exp(-m\lambda^*) \sum_{j=0}^i (-m\lambda^*)^j / j!]. \quad (4)$$

То есть, величина вероятности P_c^B сборки становится функцией лишь двух аргументов: коэффициента m , учитывающего степень последствия в потоках деталей, и коэффициента заполнения λ^* . Причем увеличение m и λ^* приводит к возрастанию вероятности P_c^B . Однако, на последствие в потоках накладывается ограничение, связанное с условиями эксплуатации вибротранспортных устройств автоматического сборочного оборудования. Из известных технологических приемов, способствующих осуществлению сборки на автоматическом сборочном оборудовании, достаточно широко применяют фаски на торцевых поверхностях сопрягаемых деталей. Количественно этот прием может быть представлен увеличением математического ожидания E_S радиального зазора на суммарный размер $(C_1 + C_2)$ фасок деталей. Тогда величина коэффициента заполнения λ^* будет определена по формуле:

$$\lambda^* = \gamma (E_s + C_1 + C_2), \quad (5)$$

где γ – интенсивность базового потока деталей в ЗС, на величину которой накладываются ограничения, обусловленные габаритными размерами деталей, измеренными в направлении их транспортирования в зоне сборки.

Увеличению коэффициента заполнения способствует также сопряжение деталей под углом. Применение этого приема количественно опишем заменой в выражении (5) математического ожидания E_s радиального зазора математическим ожиданием E_{λ} радиуса отверстия втулки. В этом случае коэффициент заполнения λ^* вычисляются следующим образом: $\lambda^* = \gamma (E_{\lambda} + C_1 + C_2)$.

Среди используемых методов повышения надежности сборки широкое распространение получило применение вибрации, сообщаемой одной или обоим сопрягаемым деталям. В вибротранспортных НСУ вибрационное воздействие на детали оказывает несущая поверхность вибrolотка ЗС. Вибрация способствует самоориентированию деталей при сопряжении. С другой стороны, скорость вибрационного воздействия на порядок выше скоростей транспортного и сборочного перемещений. Поэтому можно говорить об эффективном расширении радиального зазора соединения в пределах амплитуды относительных колебаний деталей.

Применительно к предложенной модели это равносильно увеличению коэффициента заполнения λ^* в k_T - раз.

Предложенная выше плотность вероятности $f(t)$ случайной величины t (2) позволяет также определить и необходимый объем накопителя, компенсирующего стохастичность поступающего из бункера в рабочую позицию потока деталей. Предполагая, что время t_2 выполнения сборочного процесса имеет распределение Гаусса, то его можно заменить распределением Эрланга с параметрами $\lambda_2 = (M_{t_2})^{-1}$

и $k_2 = \left(\frac{M_{t_2}}{\lambda_{t_2}} \right)^2$, а величина ошибки при замене распределений, вследствие большей дисперсии

распределения Эрланга по сравнению с распределением Гаусса, обеспечивает запас расчета. Такой подход позволяет рассматривать поток деталей, выходящий из накопителя и входящий в рабочую зону технологической машины, при условии детерминированного характера выполнения сборочного процесса, также потоком Пальма с ограниченным последствием.

Тогда буферный накопитель наполняет поток 1 Пальма деталей с параметрами λ_1, k_1 и опорожняет поток 2 Пальма деталей с параметрами λ_2, k_2 . За начальный момент времени принят момент, когда из потока 1 в накопитель поступает деталь и выходит из него в поток 2 другая деталь. Интервал времени одного цикла наполнения и опорожнения накопителя есть разность случайных временных интервалов ($t = t_2 - t_1$) между деталями в выходном и входном потоках. Конечная величина объема V накопителя достигается при условии равенства интенсивностей $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ входящего и выходящего потоков. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda \exp(k_2 \lambda t) k_1^{k_1} k_2^{k_2}}{(k_1 - 1)!(k_1 + k_2)^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_2 - 1} \frac{(-t \lambda [k_1 + k_2])^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_2 - i - 1)! i!}, & \text{при } t < 0; \\ \frac{\lambda \exp(-k_1 \lambda t) k_1^{k_1} k_2^{k_2}}{(k_2 - 1)!(k_1 + k_2)^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_1 - 1} \frac{(t \lambda [k_1 + k_2])^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_1 - i - 1)! i!}, & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (6)$$

При этом математическое ожидание $M_{\lambda}(t) = (\lambda)^{-1} - (\lambda)^{-1} = 0$; дисперсия $D_{\lambda}(t) = [(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}] / \lambda^2$, а среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\lambda}(t) = \lambda^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$.

Частная величина объема V_{ξ} накопителя, необходимая для компенсации одного цикла его наполнения - опорожнения, должна иметь величину, обеспечивающую выдачу деталей с интенсивностью λ в течение интервала времени, удаленного от своего среднего значения на $\pm 3 \sigma_{\lambda}(t)$: $V_{\xi} = 6 \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$.

Полный же объем V определяет цепь событий накопления и опорожнения, и его можно вычислить как произведение: $V = \xi V_{\xi}$, где $\xi = (p_{\xi})^{-1}$ - коэффициент обратно-пропорциональный, вероятности p_{ξ} нахождения в накопителе как минимум одной детали в частном цикле накопления - опорожнения.

Вероятность p_{ξ} есть вероятность одновременного осуществления двух независимых событий: $p_{\xi} = p_1 p_2$, где $p_1 = P\{t_1 < t\}$ - вероятность того, что интервал t_1 между деталями во входящем потоке меньше интервала t одного цикла наполнения-опорожнения накопителя. Вероятность p_1 характеризует поступление в накопитель, по крайней мере, одной детали в пределах данного цикла. Аналогично $p_2 = P\{t < t_2\}$ есть вероятность превышения над временем t одного цикла наполнения-опорожнения интервала времени t_2 между деталями в выходящем потоке, что также характеризует наличие в накопителе, по крайней мере, одной детали в пределах этого же цикла.

Для определения величины p_1 сравним случайные величины: интервала t нахождения детали в накопителе в пределах одного цикла его наполнения-опорожнения и интервала времени t_1 между деталями во входном потоке. Величина t , имеет распределение Кристалла с плотностью вероятности $f_{\lambda}(t)$ (6), а величина t_1 - распределение Эрланга с плотностью вероятности (1).

Вероятность p_1 , вычисляют как вероятность $p_1 = P\{t_1 - t < 0\}$, где вероятность того, что некоторое значение времени t нахождения детали в накопителе находится в небольшом

интервале dt , равна площади под функцией $f_\lambda(t)$ в интервале $dt = dt_1$, т.е.
 $P \{t_0 - dt/2 \leq t_0 \leq t_0 + dt/2\} = f_\lambda(t) dt$,

Тогда вероятность превышения интервалом времени t некоторого интервала времени t_0

определяется выражением: $P \{t > t_0\} = \int_{t_0}^{\infty} f_\lambda(t) dt$.

Вероятность же превышения временем t нахождения детали в накопителе значений времени t_1 , заключенных в интервале $dt = dt_1$, при условии независимости данных случайных величин

и равенства $t_0 = t_{10}$, будет иметь вид (рис.1): $P \{t_1 < t_0\} = f(t_0) \cdot dt \int_{t_0}^{\infty} f_\lambda(t) dt$.

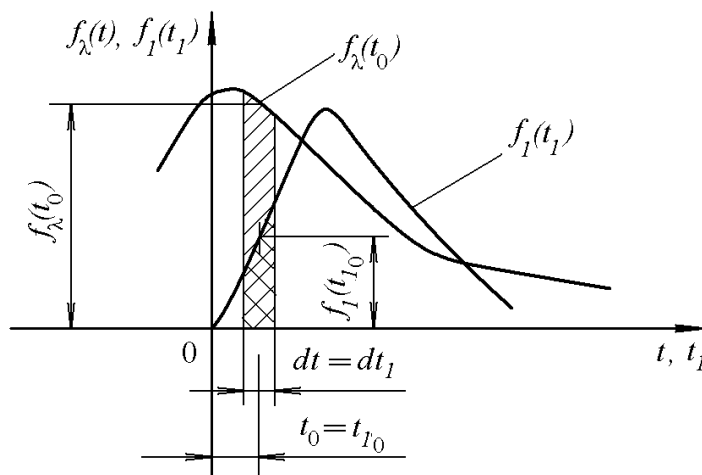


Рис.1. Определение вероятности p_1 поступления в накопитель, объемом V_ξ , как минимум одной детали

Rys. 1. Wyznaczanie prawdopodobieństwa p_1 wejścia do zasobnika buforowego, w objętości V_ξ , minimum jednej części

Вероятность p_1 поступления в накопитель хотя бы одной детали из входного потока есть вероятность превышения величиной интервала t одного цикла наполнения - опорожнения всех

возможных значений интервалов времени t_1 поступления детали в накопитель из входного потока,

$$\text{и может быть вычислена по выражению: } p_1 = \int_0^{\alpha} f_1(t_1) \left[\int_{t_1}^{\beta} f_{\lambda}(t) dt \right] dt_1, \quad (7)$$

где $\alpha = 6(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1}}$, а $\beta = 3(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$.

Аналогично вычисляют вероятность p_2 , как вероятность нахождения в накопителе как минимум одной детали в пределах цикла наполнения - опорожнения, которая есть вероятность превышения величиной интервала t_2 всех возможных значений интервала времени t этого цикла, и может быть рассчитана согласно выражению:

$$p_2 = \int_0^{\alpha} f_{\lambda}(t) \left[\int_t^{\beta} f_2(t_2) dt_2 \right] dt, \quad (8).$$

где $\alpha = 3(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$, а $\beta = 6(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_2)^{-1}}$.

Полученные зависимости позволяют определить объем V накопителей деталей для различных параметров входных и выходных потоков. Расчетами установлено, что величина V зависит от коэффициентов k_1 и k_2 последствия этих потоков и не зависит от их средней интенсивности λ (производительности).

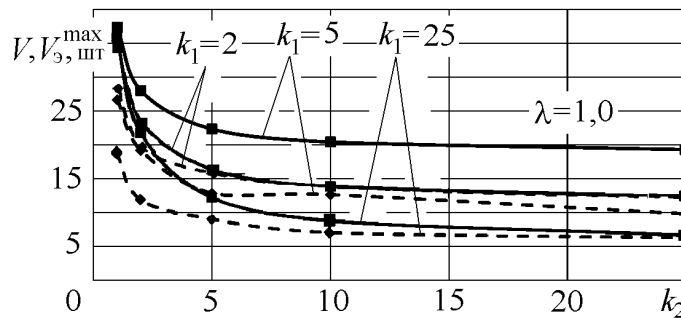


Рис. 2. Расчетные $V(k_1, k_2)$ - сплошные линии - и экспериментальные $V_9^{\max}(k_1, k_2)$ - штриховые линии- зависимости объема накопителя от коэффициентов последствия входного k_1 и выходного k_2 потоков

Rys. 2. Obliczeniowe $V(k_1, k_2)$ - linie ciągłe - i eksperymentalne $V_9^{\max}(k_1, k_2)$ - linie przerywane - zależność objętości zasobnika od współczynników sekwencji wejściowego k_1 i wyjściowego k_2 strumieni

Для проверки правомочности применения данной методики расчета выполнено статистическое моделирование процесса наполнения – опорожнения накопителя с использованием генератора Филлипса [3], позволившее установить, что теоретические значения объема V близки и несколько превышают верхние пределы экспериментальных величин $V_9^{\max} = \bar{V}_9 + 3\sigma_V$, где \bar{V}_9 и σ_V – соответственно, математическое ожидание, и среднеквадратическое отклонение моделируемой величины объема V накопителя (рис. 2). Проверка полученных результатов на опытно-промышленных образцах сборочных автоматов непрерывного действия также подтвердила возможность использования предложенной методики для практических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кристаль М.Г. Оценка погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей при автоматической сборке цилиндрических соединений//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 6. – С.20 –23.
2. Кристаль М.Г. Разработка методов проектирования автоматических устройств повышенной производительности и надежности для сборки. // Дисс... д-ра техн. наук. М.: 2009. – 509 с.
3. Phillips D.T. Generation of random gamma variates from two-parameter gamma/ D.T. Phillips // Transactions Amer. Institute of Electrical and Electronical Engineers. – 1971. - № 3. – p. 191-198.

NOWA POSTAĆ ROZKŁADÓW W ZADANIACH ZWIĘKSZANIA NIEZAWODNOŚCI AUTOMATÓW MONTAŻOWYCH

Streszczenie. W pracy przytoczono nowo opracowaną metodę wyznaczania ciągłego zasilania pozycji montażowych w potrzebne części za pomocą systemów podawania wibracyjnego z zasobników buforowych. Znane metody wyznaczania ich pojemności (np. łańcuchy Markowa) przeważnie dają zawyżone wyniki. W pracy opisano nowy rozkład wielkości przypadkowych pozwalający ocenić prawdopodobieństwo wykonania połączenia części przemieszczających się w strefie montażu.

Rafał KLUZPolitechnika Rzeszowska
Rzeszów, Polska**WYZNACZANIE ZDOLNOŚCI PROCESU MONTAŻU CZĘŚCI TYPU CZOP-TULEJA**

Ważnym zagadnieniem z zakresu pracy zrobotyzowanego stanowiska montażowego jest problem zapewnienia wymaganego prawdopodobieństwa połączenia części, a więc zapewnienia wymaganej zdolności procesu montażu. W ramach statystycznego sterowania procesami wykorzystywanych jest kilka podstawowych wskaźników zdolności, które odnoszą się albo do zdolności całych procesów, albo tylko poszczególnych maszyn [1, 8]. Chcąc ocenić zdolność procesu należy odnieść bezpośrednio jego rozrzut (szacowany zazwyczaj w oparciu o rozstęp lub odchylenie standardowe) do szerokości założonego pola tolerancji (w przypadku montażu części cylindrycznych rozrzut błędów do tolerancji względnego przemieszczenia osi łączonych elementów). Im wartość błędu generowana na stanowisku montażowym jest mniejsza w odniesieniu do szerokości tolerancji względnego przemieszczenia osi części, tym zwiększa się prawdopodobieństwo połączenia części, a proces jest bardziej zdolny [2]. W przypadku procesu montażu części cylindrycznych wyznaczenie zdolności procesu utrudnione jest koniecznością dokonywania analizy w płaszczyźnie prostopadłej do osi kojarzonych części. W literaturze przedmiotu znanych jest kilka metod wyznaczania zdolności procesu. W większości przypadków polegają na porównywaniu objętości lub pola powierzchni rozrzutu badanej cechy do objętości lub pola tolerancji [3,7,8]. Jednakże złożoność obliczeń koniecznych do przeprowadzenia podczas analizy stawia pod znakiem zapytania możliwość zastosowania tych metod w przedsiębiorstwach. Z drugiej jednak strony dążenie przedsiębiorstw do upraszczania obliczeń dokonywanych podczas badania zdolności procesu, doprowadza do znacznego uproszczenia analizy i przyjęcia metody, której wyniki w wielu przypadkach mogą nieodzwierciedlać rzeczywistego charakteru błędów generowanych na stanowisku montażowym i prowadzić do błędnych wyników. Dlatego niniejsza praca poświęcona jest zagadnieniu opracowania metody wyznaczania zdolności procesu, która uwzględniałaby specyficzne warunki procesu montażu, pomijane w metodach uproszczonych, a jednocześnie byłaby na tyle prosta w zastosowaniu, aby mogła być wykorzystana w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.

TOLERANCJA WZGLĘDNEGO PRZEMIESZCZENIA OSI ŁĄCZONYCH CZĘŚCI

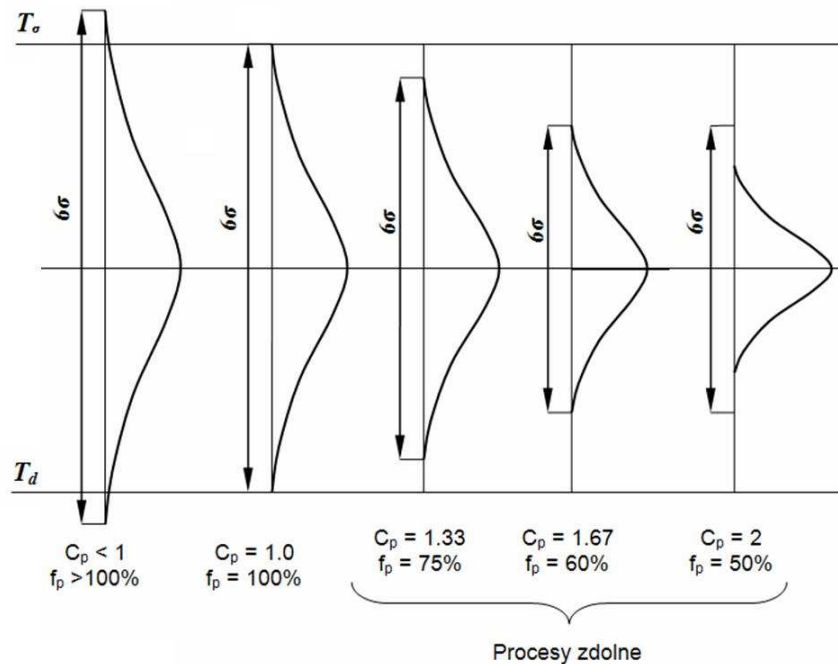
W zagadnieniu jednowymiarowym wyznaczania zdolności procesu wartość wskaźnika C_p (zdolności procesu) jest ilorazem założonego pola tolerancji do jego rozrzutu, szacowanego najczęściej w oparciu o rozstęp lub odchylenie standardowe (rys. 1). Im szerokość procesu jest mniejsza w odniesieniu do szerokości pola tolerancji tym proces jest bardziej zdolny. Zakładając, że „szerokość” procesu można wyrazić jako 6 odchyleń standardowych (założenie to jest właściwe dla rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym, przy innych rozkładach stosuje się inne wzory), można skonstruować wzór na podstawowy wskaźnik oceny zdolności procesu C_p [4, 6]:

$$C_p = \frac{T_d - T_g}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma} \quad (1)$$

gdzie: T_g – górna wartość tolerancji, T_d – dolna granica tolerancji, σ – odchylenie standardowe.

Jak można wywnioskować z konstrukcji tego wzoru, im wskaźnik ten ma wyższą wartość, tym lepszy proces. W przypadku, gdy wartość ta wynosi 1 (szerokość procesu jest równa zakresowi tolerancji), to zgodnie z własnościami rozkładu normalnego wadliwość wynosi 0,27%. W zależności od wymagań klienta może to być dużo lub mało. Ogólnosiwiatowym standardem jest tu wartość 1,33, przy której wadliwość wynosi około 0,0063%. [1, 4, 6]

W przypadku montażu części cylindrycznych zagadnienie wyznaczania zdolności procesu jest znacznie bardziej złożone. Główny wpływ na poprawny przebieg montażu części ma odległość między osiami kojarzonych części, która powinna zawierać się w polu tolerancji na dopuszczalne względne ich przemieszczenie. Ponieważ zarówno średnica tulei jak i wału wykonywane są w pewnej tolerancji wykonania, dlatego w zależności od przyjętej metody montażu tolerancja na względne przemieszczenie osi łączonych elementów będzie przyjmowała różną wartość.



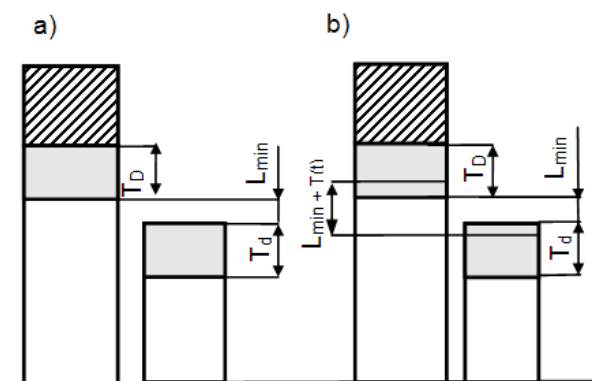
Rys. 1. Położenia pól rozrzutu 6σ względem pola tolerancji T i odpowiadające im wartości C_p ($f_p = 6\sigma/T$ - stosunek rozproszenia do tolerancji) [6]

a) metoda zamenności pełnej

W metodzie zamenności pełnej wymagane jest prawdopodobieństwo połączenia części bliskie 100%. Zatem w tym przypadku tolerancja na względne przemieszczenie osi łączonych części odpowiada luzowi minimalnemu rozpatrywanej jednostki montażowej (rys. 2):

$$T_{\Delta} = L_{min} = D_{min} - d^{max} \quad (2)$$

gdzie: D – średnica otworu, d – średnica wałka



Rys. 2. Tolerancja względnego przemieszczenia osi łączonych części,
a) zamienność pełna. b) zamienność częściowa

b) metoda zamienności częściowej

W przypadku metody zamienności częściowej zakłada się, że równoczesne wystąpienie niekorzystnych granicznych wartości odchyłek w łańcuchach wymiarowych występuje bardzo rzadko. Można zatem posługując się zasadami rozkładu prawdopodobieństwa zwiększyć wartość tolerancji względnego przemieszczenia osi łączonych elementów, tym bardziej iż w przypadku większości przedsiębiorstw dopuszczalna wartość wskaźnika zdolności procesu C_p podczas wytwarzania części maszyn wynosi 1.33, co odpowiada 75% udziałowi pola rozrzutu właściwość względem pola tolerancji (rys. 1, b).

Wartość tolerancji względnego przemieszczenia osi łączonych części można zatem zwiększyć o wartość $T(r)$:

$$T_{\Delta l} = L_{min} + T(t) \quad (3)$$

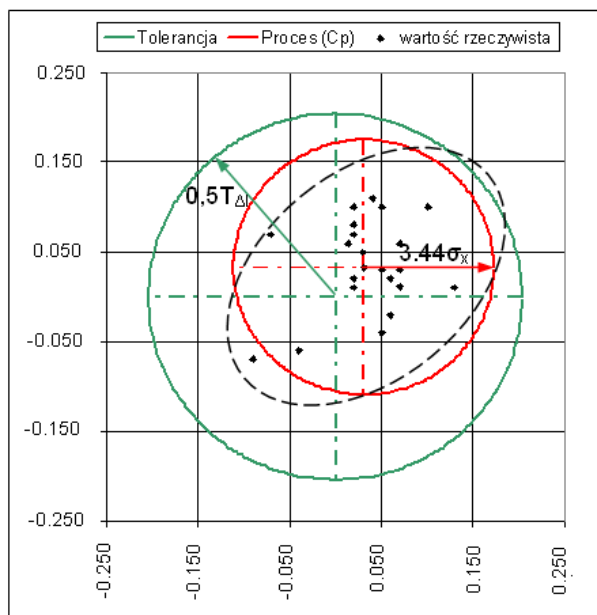
$$T(t) = T_D + T_d - t \sqrt{c_D^2 T_D^2 + c_d^2 T_d^2} \quad (4)$$

gdzie: T_D , T_d – tolerancja tulei i wałka, t – współczynnik ryzyka (wartości $t = 3$ odpowiada 0.27% niezrealizowanych połączeń), c_D , c_d – współczynnik rozproszenia pola rozrzutu dla tulei i wałka

METODA MAKSYMALNEGO ODCHYLENIA STANDARDOWEGO

Jedną częściej stosowanych w warunkach przemysłowych metod wyznaczania zdolności procesu jest metoda, polegająca na wyznaczeniu błędu względnego przemieszczenia osi łączonych elementów w dwóch prostopadłych kierunkach i przyjęciu do obliczeń wartości maksymalnego odchylenia standardowego błędu względnego przemieszczenia osi łączonych części ($\sigma_{\max}(x,y)$). Przy takim podejściu wskaźnik zdolności procesu przyjmuje następującą postać [1, 3]:

$$C_p = \frac{0.5T_{\Delta l}}{3\sigma_{\max}(x,y)} \quad (5)$$



Rys. 3. Porównanie obszaru tolerancji względnego przemieszczenia osi łączonych części $T_{\Delta I}$ i pola rozrzutu błęd generowanego w trakcie realizacji procesu

Przedstawiona metoda jest prosta w zastosowaniu, albowiem nie wymaga skomplikowanych obliczeń. Uzyskane na jej podstawie wyniki analizy zdolności procesu są jednak poprawne jedynie w przypadku, gdy rozpatrywane zmienne są niezależne stochastycznie. W przypadku, gdy zachodzi korelacja między zmiennymi mamy do czynienia z elipsami koncentracji prawdopodobieństwa nachylonymi pod pewnym kątem do przyjętego układu współrzędnych (rys. 2). Wykorzystanie zatem zależności (4) do analizy zdolności procesu może w pewnych przypadkach prowadzić do błędnej interpretacji wyników pomiarów i uznania za zdolny proces nie będący zdolny jakościowo.

WYZNACZENIE MAKSYMALNEJ ODLEGŁOŚCI MIĘDZY OSIAMI

Jeżeli na proces montażu nie oddziałują czynniki specjalne, błąd względnego przemieszczenia osi łączonych części można opisać dwuwymiarową funkcją gęstości normalnego rozkładu prawdopodobieństwa [4, 5]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det[\lambda_{jk}]}} \exp[\Lambda_x x^2 + \Lambda_y y^2 + 2\Lambda_{xy} xy] \quad (6)$$

Rozwiązując równanie:

$$\Lambda_x x^2 + \Lambda_y y^2 + 2\Lambda_{xy} xy = \lambda^2 \quad (7)$$

można otrzymać elipsoidy koncentracji prawdopodobieństwa, na powierzchniach których gęstość prawdopodobieństwa ma stałą wartość. Prawdopodobieństwo zdarzenia, zmienna losowa x, y , będzie leżała wewnątrz elipsy podlega rozkładowi chi – kwadrat o dwóch stopniach swobody $\chi^2(2)$.

$$\lambda^2 = \chi^2_{\alpha}(2) \quad (8)$$

Elipsy koncentracji prawdopodobieństwa są miejscami geometrycznymi punktów, na których gęstość prawdopodobieństwa błędu ma stałą wartość. Równanie rodzin elipsoid, dla różnej wartości prawdopodobieństwa umożliwia wyznaczenie granic obszaru błędu względnego przemieszczenia osi części, przy żądanym prawdopodobieństwie zajścia tego zdarzenia. W związku z tym, z punktu widzenia procesu montażu, parametrem umożliwiającym oszacowanie z zadowalającą dokładnością maksymalny błąd względnego przemieszczenia osi łączonych części (z uwzględnieniem zależności między zmiennymi) jest odległość skrajnego punktu elipsy koncentracji prawdopodobieństwa od żądanego nominalnego położenia. Parametr ten reprezentowany jest przez największą półoś R rozważanej elipsy (rys. 4).

W ogólnym przypadku elipsy koncentracji prawdopodobieństwa o równaniu (7) są krzywymi stopnia drugiego reprezentowanymi poprzez równanie [5]:

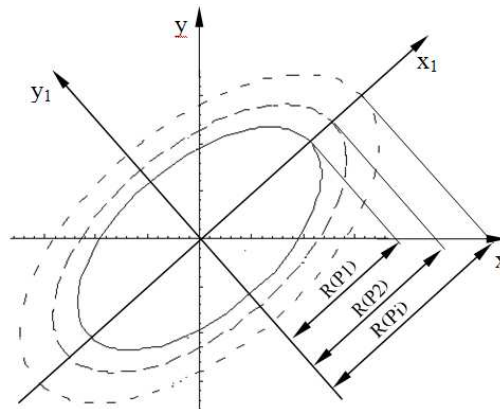
$$\Lambda_x x^2 + 2\Lambda_{xy} xy + \Lambda_y y^2 + 2\Lambda_{x0} x + 2\Lambda_{y0} y + \lambda^2 = 0 \quad (9)$$

gdzie wyznacznik:

$$w = \begin{vmatrix} \Lambda_x & \Lambda_{xy} \\ \Lambda_{xy} & \Lambda_y \end{vmatrix} \quad (10)$$

nazywany małym wyróżnikiem równania (9) oraz wyznacznik:

$$W = \begin{vmatrix} \Lambda_x & \Lambda_{xy} & \Lambda_{x0} \\ \Lambda_{xy} & \Lambda_y & \Lambda_{y0} \\ \Lambda_{x0} & \Lambda_{y0} & \lambda^2 \end{vmatrix} \quad (11)$$



Rys. 4. Schemat przedstawiający elipsy koncentracji prawdopodobieństwa błędu względnego przemieszczenia osi łączonych części: R – długość dłuższej półosi elipsy, P – prawdopodobieństwo zdarzenia, że zmienna losowa błędu znajdzie się wewnątrz elipsy o półosi R

nazywany dużym wyróżnikiem równania (9) a także wyrażenie $p = \Lambda_x + \Lambda_y$ są niezmiennikami przesunięcia i obrotu układu Oxy . Chcąc zatem wyznaczyć wielkość najdłuższej półosi należy sprowadzić rozważane równanie do postaci kanonicznej, dokonując zmiany układu współrzędnych, a mianowicie dokonać obrotu.. W rozważanym przypadku mały wyróżnik równania $w \neq 0$, w związku z czym istnieje zawsze taki układ $O'x'y'$, że równanie (9) przyjmuje w nim postać:

$$Ax'^2 + By'^2 + C = 0 \quad (12)$$

gdzie: $C = W/w$

Znajdując liczby A i B poprzez rozwiązanie układu równań niezmienników:

$$\begin{cases} A + B = p \\ AB = w \end{cases} \quad (13)$$

Można wyznaczyć długość półosi elipsy R , wewnątrz której z żądanym prawdopodobieństwem znajdzie się wektor błędu względnego przemieszczenia osi łączonych elementów:

$$R = \sqrt{\frac{2\chi_\alpha^2}{\Lambda_x + \Lambda_y - \sqrt{\Lambda_x^2 - 2\Lambda_x\Lambda_y + \Lambda_y^2 + 4\Lambda_{xy}^2}}} \quad (14)$$

gdzie $\chi_\alpha^2(2)$ - kwantyle rzędu α rozkładu chi – kwadrat o dwóch stopniach swobody, oraz:

$$\Lambda_x = \frac{\sigma_y^2}{-cov(x, y)^2 + \sigma_y^2\sigma_x^2} \quad (15)$$

$$\Lambda_y = \frac{\sigma_x^2}{-cov(x, y)^2 + \sigma_y^2\sigma_x^2} \quad (16)$$

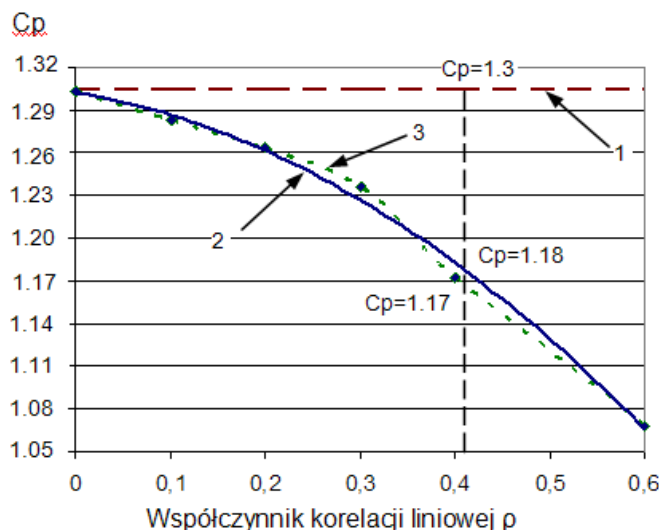
$$\Lambda_{xy} = \frac{-cov(x, y)}{-cov(x, y)^2 + \sigma_y^2\sigma_x^2} \quad (17)$$

Zatem ostateczna postać wskaźnika zdolności procesu Cp , przyjmuje następującą postać:

$$Cp = \frac{0.5T_{\Delta}}{R(\alpha=0.9973)} \quad (18)$$

WERYFIKACJA METOD

W celu zweryfikowania adekwatności przedstawionych metod przeprowadzono symulację procesu montażu, a uzyskane wyniki porównano z wartościami wskaźników uzyskanymi na podstawie zależności (5) i (18) (rys.5).



Rys. 5. Zależność przedstawiająca wpływ współczynnika korelacji liniowej ρ na wartość wskaźnika zdolności procesu C_p (1 – metoda maksymalnego odchylenia standardowego, 2 – wyniki symulacji, 3 – metoda proponowana)

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wartość wskaźnika zdolności procesu uzyskana metodą maksymalnego odchylenia standardowego ($C_p = 1.3$) obarczona jest największym błędem. Błąd ten dla wyników pomiarów przedstawionych na rysunku 2 wynosi 12%. Uzyskana na podstawie przedstawionej w pracy metody wartość wskaźnika ($C_p = 1.17$) nieznacznie odbiega od wartości uzyskanej w drodze symulacji ($C_p = 1.18$). Wartość błędu wynosi w tym przypadku 1%. Analiza rysunku 5 potwierdza również fakt, że metoda uproszczona może być stosowana jedynie wówczas, gdy istnieje pewność, że między analizowanymi zmiennymi nie występuje zależność stochastyczna, gdyż w miarę zwiększania się wartości współczynnika korelacji liniowej ρ gwałtownie zwiększa się różnica między wartością wskaźnika C_p wyznaczoną na jej podstawie a wartością uzyskaną w drodze symulacji.

PODSUMOWANIE

Istniejące obecnie standardy zarządzania jakością wymagają od przedsiębiorstw nieustannego doskonalenia jakości realizowanych procesów. Nieodzownym elementem sterowania i doskonalenia jakości procesów są wskaźniki zdolności procesów. Z uwagi na złożoność procesu montażu, wymagającego dokonywania analizy w płaszczyźnie prostopadłej do osi kojarzonych części, większość przedsiębiorstw wykorzystuje do wyznaczania zdolności procesu metody uproszczone, co może prowadzić do powstawania niezgodności w przebiegu procesów i generowania dodatkowych kosztów związanych z przestojem linii montażowej. Przedstawiona w pracy metoda wyznaczania zdolności procesu uwzględnia możliwość wystąpienia zależności stochastycznej między wektorami błędów, będącej główną przyczyną niedokładności metod uproszczonych. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały ponadto, że

w zależności od wartości parametrów zmiennych losowych i wartości kowariancji między składowymi wektora błędu względnego przemieszczenia osi łączonych części, uzyskana za pomocą metod uproszczonych wartość wskaźnika zdolności może być zawyżona nawet o 25% w stosunku do wartości wskaźnika C_p uzyskaną na podstawie zaproponowanej metody, zweryfikowanej badaniami symulacyjnymi.

LITERATURA

1. Grau D.: New process capability indices for one-sided tolerances, *Quality Technology Quantitative Management*, vol.6, 2009, nr 2, s. 107-124.
2. Greber T., Badanie zdolności procesów – niebezpieczne wskaźniki, *Zarządzanie Jakością*, 2005, nr 1, s. 43-51.
3. Jessenberger J. Wehs C.: A note on a multivariate analogue of the process capability index C_p , *Quality Technology Quantitative Management*, vol.5, 2009, nr 2.
4. Kluz R., Montowalność czopowo – tulejowych połączeń realizowanych przez roboty montażowe, *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2007, nr 2, s. 17–20
5. Kotulski Z., Szczepiński W., *Rachunek kosztów dla inżynierów*, Warszawa, WNT 2004.
6. Łunarski J.: *Zarządzanie jakością: standardy i zasady*, WNT, Warszawa 2008.
7. Tresa D., Automation of casting, *Archives of Foundry*, 2006, vol. 6, nr 18, s. 513-514
8. Zahid A., Sultana A.: Assessment and comparison of multivariate process capability indices in ceramic industry, *Journal of Mechanical Engineering*, vol. ME39, 2008, nr 1, s.18-25.

DETERMINING A PROCESS CAPACITY FOR ASSEMBLY PROCES OF PARTS PIN-SLEEVE TYPE

Abstract. The article presents the assurance problems of the required capacity of machine cylindrical parts assembly process, which is realized on the robotized assembly position. In the article the most popular methods for fixing the capacity process coefficient C_p are presented. On this base the own methods of fixing this index are proposed. In the last part of the article the values of capacity process coefficient C_p are compared with computer simulation results.

S.A. WASILIEW
W.F. GROMOW
A.A. ŁARIN
W.I. REZNICZENKO

Techniczny Uniwersytet Narodowy MAI
Moskwa, Rosja

WSPÓŁCZESNE METODY KONTROLI WYROBÓW Z KOMPOZYTÓW ZA POMOCĄ TOMOGRAFII

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОМОГРАФИИ

Широкое внедрение в производство изделий машиностроения, в частности, самолетостроения, судостроения и автомобилестроения новых современных композиционных материалов (КМ) взамен легких сплавов и сталей, свойства которых находятся на предельном уровне, обусловлено не только высокими физико-механическими свойствами КМ, меньшей массой деталей из КМ по сравнению с деталями из алюминиевых, титановых и стальных сплавов, но и возможностью конструктора конструировать материал под заранее заданные свойства для агрегатов изделий, работающих в сложных условиях.

В отличие от металлов, поступающих в производство с известными физико-механическими свойствами, композиционный материал только приобретает эти свойства по окончании производства изделия, то есть композиционный материал как конструкционный материал возникает не в начале, а в конце технологического процесса изготовления изделия. Поэтому первоочередной задачей является определение и контроль физико-механических, теплофизических и иных свойств полученного композита на соответствие расчетным значениям.

С другой стороны, на качество композиционного оказывают влияние многие технологические и конструктивные факторы. Сочетание этих факторов, а также ошибки объективного и субъективного характера – всё это приводит к появлению в изделии из композиционных материалов неблагоприятных эффектов. Эти отрицательные эффекты проявляются в появлении локальных внутренних макродефектов – раковин, расслоений, непрочных – место и вероятность появления которых в изделии из композиционного материала носит случайный характер. Однако вероятность их появления в изделиях из композитов велика, а для деталей ответственного назначения появление таких дефектов недопустимо.

Для выявления дефектов в изделии из композиционных материалов проводят операцию дефектоскопии. Однако отсутствие дефектов и соответствие физико-механических свойств КМ являются необходимыми, но недостаточными условиями прочности готовых изделий, поскольку на прочность влияют и другие факторы – конструктивные и эксплуатационные.

Одним из актуальных вопросов применения в современных конструкциях изделий машиностроения новых композиционных материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики изделий, качество и надежность, является применение современных методов неразрушающего контроля агрегатов.

В соответствии с ГОСТ 18353 -73 приняты следующие виды неразрушающего контроля: акустический, магнитный, оптический, радиационный, тепловой, ультразвуковой, импедансный и др. [1, 2, 3].

Использование акустических, импедансных, ультразвуковых методов не позволяет четко определить дефект при сложных пакетах и больших толщинах, а современные конструкции именно и отличаются наличием таких деталей, в состав которых входят разные слои из углепластика, органопластика, стеклопластика, сот и пенопластов, обладающих разной проницаемостью, плотностью и другими физико-механическими характеристиками. Кроме того, существующие методы неразрушающего контроля фактически не позволяют произвести контроль качества прочности клеевых соединений. Целью работы была разработка методов и средств контроля изделий из композиционных материалов с применением томографа.

Внедрение в промышленность методов томографии позволяет произвести количественный неразрушающий контроль качества внутренней пространственной структуры широкого спектра ответственных авиационных и авиадвигательных узлов и деталей из композиционных материалов, многослойных конструкций, клеевых соединений, сотовых конструкций, теплозащиты, лопастей вертолетов, лопаток турбин и вентиляторов, сварных и паяных соединений и др. То есть практически на всех этапах жизненного цикла изделия, начиная от входного контроля материалов, отработки технологического процесса, мониторинга серийной технологической дисциплины до диагностики в процессе испытаний, эксплуатации и ремонта.

Принцип работы томографа основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры сечений (томограмм) объекта контроля (ОК) в результате совместной вычислительной обработки теневых проекций, полученных при просвечивании ОК ионизирующим излучением в различных направлениях. [4].

Была разработана методика проведения контроля отсека крыла из углепластика с помощью томографа. Рентгеновская реконструктивная вычислительная томография – высокоэффективный метод радиационного неразрушающего контроля, сочетающего физические и информационные достоинства традиционного рентгеновского просвечивания с достижениями вычислительной математики и цифровой техники в решении задач интроскопии.

Существо рентгеновской реконструктивной вычислительной томографии сводится к реконструкции детальных характеристик внутренней пространственной структуры объекта контроля в результате совместной математической обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта контроля в различных направлениях.

По чувствительности контроля рентгеновская реконструктивная вычислительная томография на два порядка превышает традиционные технические средства радиационного неразрушающего контроля. Цифровое представление результатов рентгеновского томографического контроля выгодно дополняет привычную форму отображения исследуемых структур в виде яркостных или цветных изображений. Бесконтактность исследования и длительное запоминание цифровой информации об объемной структуре объекта контроля создают качественно новые возможности использования результатов томографического контроля на протяжении всей «жизни» объекта контроля: непосредственно в процессе изготовления, при хранении, эксплуатации, ремонте, испытаниях.

Технические характеристики рентгеновского вычислительного томографа

BT-1500XA соответствуют следующим показателям:

Максимальный диаметр объекта контроля, мм	1500
Максимальный вес объекта контроля, кг	500
Диаметр рабочего поля томограммы, мм	1500..100
Эффективная толщина контролируемого слоя, мм	5..0,5
Погрешность измерения размеров внутренних структурных элементов, мм	0,1
Чувствительность к произвольно ориентированным трещинам, мм	0,1
Максимальное напряжение рентгеновской трубки, кВ	450
Время сканирования и реконструкции томограммы на поле 600мм, мин	10
Среднеквадратичная погрешность измерения отклонения плотности, %	0,5
Возможность реконструкции томограмм в темпе сканирования	имеется

Возможность сканирования и реконструкции локальных зон объекта	имеется
Режим цифровой рентгенографии с рабочим полем до 600 x 800 мм	имеется
Режим многослойного сканирования и 3D реконструкции	имеется
Возможность документирования изображений томограмм и оцифрованных графиков сечений на бумажном носителе	имеется

Томограмма многолонжеронного крыла из углепластика представлена на рис. 1

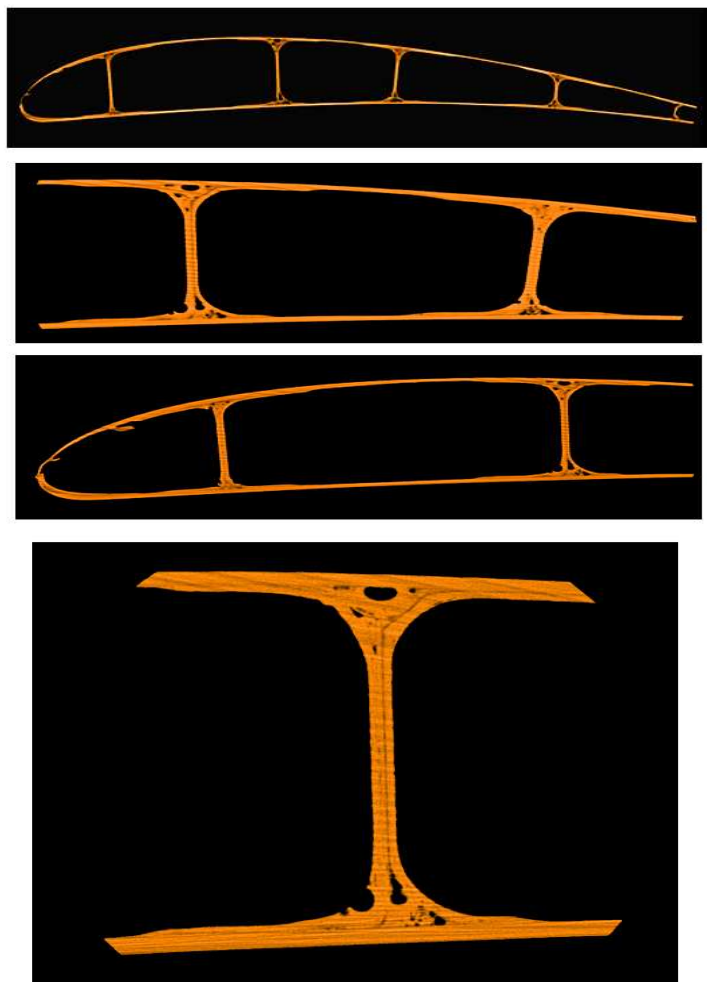


Рис.1.

Rys. 1.

Из рисунка видно, что в местах стыка стенок лонжерона с обшивкой имеется непрочность, которые свидетельствуют о недостаточном давлении в этих местах и других недостатках технологического процесса.

ВЫВОДЫ

На основании результатов контроля с помощью томографа, используя результаты томограмм, можно дать рекомендации по выбору параметров техпроцесса и изменению конструкции оснастки. Томограмма позволяет не только показать структуру КМ внутри изделия, но и косвенно оценить прочность сцепления по толщине клеевого слоя, цвету пленки – прослойки связующего и другим параметрам. Использование томографа позволяет на этапе опытного производства правильно выбрать параметры технологического процесса, отработать режимы прессования и конструктивные элементы изделия. Практически на современном этапе нет более совершенного метода, который позволял бы в 3D просмотреть внутреннюю структуру изделия, количественно замерить дефекты и дать конкретные рекомендации по ремонту или отбраковке изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резниченко В.И. Изготовление лопастей вертолетов из неметаллических материалов. М.: МАИ, 1977.
2. Резниченко В.И., Хомич В.И. Применение композиционных материалов в энергетике, электротехнике, электронике. Центральный Российский Дом Знаний.-М.,1992.
3. Попов Ю.И., Резниченко В.И. Проектирование и изготовление узлов и деталей планера самолета из композиционных материалов. М.: МАИ, 1994.
4. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Практ. пособие под ред. проф. Сухорукова В.В.
5. М.: Высш. шк., 1992.

WSPÓŁCZESNE METODY KONTROLI WYROBÓW Z KOMPOZYTÓW ZA POMOCĄ TOMOGRAFII

Streszczenie. W pracy przedstawiono problemy kontroli wyrobów z materiałów kompozytowych przy zastosowaniu rentgenowskiej, obliczeniowej tomografii umożliwiającej uwidocznienie struktury wewnętrznej kompozytu. Pozwala to pośrednio ocenić właściwości wytrzymałościowe i wady klejenia. Zastosowanie takiej tomografii na etapie przygotowania prototypu umożliwia właściwy dobór parametrów technologicznych i dopracowanie technologiczności konstrukcji oraz uwidocznienie budowy wewnętrznej i ewentualnych wad. Pozwala to na poprawienie konstrukcji i cech wyrobu.