

621.9.06

Решение вопроса о степени загрузки оборудования гибкой сборочной линии с помощью статистического моделирования.

Пипенко Елена Витальевна, Пышечкин Николай Александрович

Студенты 4 курса

Кафедра: Технология машиностроения

Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ)

Научный руководитель: Петухов Сергей Леонидович

Кандидат наук, Доцент, кафедра «Технология машиностроения»

Эффективное использование технологического оборудования в ГПС в значительной степени зависит от ее структуры, определяемой на стадии проектирования. Исходной информацией для проектирования являются сведения о номенклатуре подлежащих сборке изделий (о составе и размере отдельных партий, программах выпуска, видах и размерах соединений), типах сборочных модулей, ограничениях на выбираемое оборудование, инструмент, сборочную оснастку, производственные площади и т.д. Значительная номенклатура собираемых изделий, многообразие маршрутов сборки, стохастический характер поступления различных партий изделий на сборку и объемов этих партий, неполнота априорной информации на этапе проектирования требует решения сложной многовариантной задачи при определении компоновочной схемы линии сборки. Выбор технологического оборудования должен учитывать его встраиваемость в ГПС, конструктивно-компоновочную, энергетическую, информационную совместимость с другими техническими средствами, входящими в состав ГПС, требующуюся производственную площадь.

В зависимости от технологических возможностей в процессе функционирования ГПС сборочные модули могут работать по принципу взаимозаменяемости, взаимодополнения и одновременного использования этих принципов. Выбор принципа организации и взаимодействия сборочных модулей зависит от их технологических возможностей, обеспечения оперативной смены запрессовочных, резьбозавертывающих и других устройств, от номенклатуры подлежащих сборке изделий и заданной программы их выпуска. Принятая организация взаимодействия сборочных модулей в зависимости от условий производства может быть изменена путем переналадки оборудования.

Процесс проектирования включает в себя определение количества сборочных и контрольно-измерительных позиций, количество и объем накопителей, пространственное расположение основного и вспомогательного оборудования; разработка управления транспортной системой. На этапах выбора состава технологического оборудования и структуры автоматизированной линии из этого оборудования возможны альтернативные варианты, то есть неоднозначность выбора технических решений. Капитальные вложения и риск ошибочного решения могут быть снижены за счет рассмотрения нескольких вариантов, адекватных производственному процессу в ГПС, то есть при проектировании должны сравниваться альтернативные варианты. Возникает задача выбора из возможного многообразия структур оптимального варианта, которая решается поэтапно.

На первом этапе определяется оптимальный вариант компоновки ГПС, который характеризуется классом концентрации операций, количеством сборочных и контрольно-измерительных позиций; количеством транспортных устройств, систем

загрузки и разгрузки, накопителей; предварительной компоновочной схемы. Осуществляется синхронизация работы гибких сборочных модулей ГПС, управление материальными потоками. В зависимости от конкретных производственных условий критериями управления могут быть: минимизация времени переналадки оборудования при переходе на выпуск новых изделий, максимальная гибкость к изменениям критериев функционирования и другие. В качестве теоретической базы при решении этих задач используется метод направленного поиска, линейное программирование, теория графов.

Второй этап проектирования связан с оптимизацией выбранного варианта относительно целевых параметров; выбора оптимальной структуры транспортной системы; получения максимальной суммарной загрузки основного технологического оборудования и оптимальных параметров сборочной линии; максимальной производительности ГПС и др. При сборке изделий в гибких производственных системах затраты времени на вспомогательные операции (установка, транспортировка, хранение узлов и деталей), а также время ожидания зависят в значительной степени от структурного построения этой системы. Исходя из этого, на стадии проектирования необходимо уделить особое внимание правильности выбора структурного варианта ГПС. В настоящее время при проектировании сложных структур и компоновок многопозиционных автоматизированных линий используется метод статистического моделирования работы технологического оборудования, существенно повышающий качество проектных решений и точность расчетов на стадии проектирования. Статистическое моделирование представляет собой имитацию функционирования сложных автоматизированных комплексов на основе использования закономерностей, полученных с помощью производственного эксперимента.

Для сборки валов коробок передач, выбранных на разных заводах-изготовителях, была спроектирована гибкая автоматизированная линия, в которой использовалось однотипное оборудование с переналадкой установочных приспособлений, ориентирующих и подающих устройств и механизмов.

Практика создания гибких сборочных линий выдвинула задачу повышения эффективности их загрузки, достижения заданного уровня коэффициента технического использования. Оптимальный вариант загрузки существенно повышает технико-экономическую эффективность. Для решения задачи с любым числом переменных наиболее распространенным и универсальным является симплекс-метод, реализующий идею последовательного улучшения решения. Для поиска оптимальной загрузки использовался метод линейного программирования.

При создании гибкой переналаживаемой линии решались задачи обеспечения максимального использования ее ресурсов, расход которых обусловлен выбором наиболее экономичной гибкости и организационно-планового обеспечения.

Сборка изделий на линии производится партиями, размеры которых экономически обоснованы и соответствуют оптимальной загрузке оборудования - $\hat{E}_{\zeta, i, \text{нб}}$, предусмотрена оптимальная периодичность смены отдельных партий для гарантированного выпуска конечной продукции в заданные сроки и с минимальными приведенными затратами - $\zeta_{\text{нб}} \min$. Рассчитанное распределение объемов партий валов должно обеспечить такое функционирование линии, при котором величина $\hat{E}_{\zeta, i}$ будет находиться в пределах допустимого. Для оценки равномерности распределения объемов выпуска валов использовалась характеристика, называемая в теории информации энтропией.

Проведенные расчеты дали возможность получить интегральную оценку колебаний объемов производства и концентрации выпуска продукции через значение

энтропии для любой совокупности валов. Были определены приведенные затраты в связи с изменением потребности в ресурсах, получена количественная оценка объединения валов в партии для сборки и оценены потери из-за излишнего резервирования мощностей и других резервов производства. Проведенная оценка показала целесообразность принятого распределения программы выпуска по плановым отрезкам года и возможность достижения оптимальной устойчивости производства при освоении новых изделий.

Для решения задач определения оптимального числа партий различных изделий, запускаемых на сборку на нескольких модулях в течение смены, применяют общие методы линейного программирования. Каждое граничное условие изображается не прямой, а плоскостью. Областью допустимых решений является многогранник, ограниченный этими плоскостями. Например, при сборке на производственно-технологическом комплексе двух видов валов коробки передач автомобиля (первичный и вторичный) на трех типах модулей с различным числом позиций (модули А, В и С), необходимо оптимизировать объемы партии изделий, обеспечивающие наибольшую эффективность использования модулей. Поставленная цель - при требуемой программе выпуска изделий обеспечить заданную величину коэффициента технического использования

За базовую конструкцию изделия была принята конструкция, обладающая наибольшим числом общих признаков всей группы валов. Все остальные конструкции представляли собой модификации базовой. Разработанная технологическая схема групповой сборки включила в себя все операции сборки базового вала.

Для этой схемы групповой сборки была выбрана компоновка гибкой автоматизированной линии. Шестерни на сборку должны поступать комплектом с ранее прикатанными и подобранными по контактному пятну ведущей и ведомой шестернями. Принятая схема базирования собираемого узла обеспечила минимальную погрешность установки.

Линия оснащена устройствами, автоматизирующими подачу, ориентацию и установку роликовых подшипников и сальников. Предусмотрены специальные устройства для смазки подшипников, нанесения консистентной смазки и подачи герметизирующей пасты в гнезда картера. Также автоматизированы операции по измерению положения подшипников в картере, завертыванию гайки с тарированным крутящим моментом, контроль биения соединительных фланцев и клеймения узлов в сборе.

Основным методом повышения производительности является деление линии на участки с промежуточными накопителями заделов. Расчет производительности сборочного оборудования сводится к расчету коэффициента использования с помощью статистического моделирования.

Моделирование использовалось как для укрупненного сравнения нескольких вариантов компоновок автоматизированных линий сборки, так и для детального анализа различных стратегий обслуживания и параметров линии.

Моделирование позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии сборочного оборудования и его параметрах получить сведения о состоянии оборудования в произвольный момент времени. Разработанная авторами программа для вычисления показателей надежности гибких автоматических линий с промежуточными накопителями заделов дает возможность не только оценить вероятность безотказной работы, то есть функциональную надежность, но и позволяет одновременно учитывать влияние параметрической надежности (соответствие точности сборки изделия заданным параметрам) в зависимости от реализованных в системе компоновочных решений.

Предполагается, что каждая автоматическая позиция может находиться в пяти состояниях: работоспособное; «отказ-восстановление»; опустошение предшествующего накопителя; переполнение последующего накопителя для готовой детали; параметрический отказ.

Каждая из ручных позиций может находиться в тех же состояниях, за исключением «отказ-восстановление». При моделировании работы сборочной линии для каждой позиции определяется и запоминается случайное время до очередной смены состояния i -й позиции TO_i . Из этих времен TO_i , выбирается минимальное $TO_{\min}=TO_k$, т.е. устанавливается, что очередная смена состояния произошла на k -ой позиции, и рассматривается, в какое из пяти состояний попала эта позиция. В результате, текущее время TO_k увеличивается на ту или иную величину (в зависимости от состояния позиции). Затем, снова из всех разыгранных в соответствии с экспоненциальным распределением времен выбирается минимальное и повторяется та же операция с новым TO_{\min} .

Анализ значительного количества экспериментальных данных показал, что случайное время безотказной работы сборочных позиций ($t_{\text{отказ}}$) может быть описано

законом Вейбулла: $t_{\text{отказ}} = \frac{\bar{t}_{\text{отказ}}}{\tilde{A}(1 + \frac{1}{b})} \sqrt[b]{-\ln X}$, а время восстановления распределено по

экспоненциальному закону: $t_{\text{отказ}} = \frac{1}{\mu_{\text{отказ}}} \ln(1 - X)$, где $\bar{t}_{\text{отказ}}$ - наработка на отказ; Γ - гамма-функция; b - показатель степени, определяющий форму кривой распределения; $\mu_{\text{отказ}} = \frac{1}{\bar{t}_{\text{отказ}}}$ - интенсивность восстановления отказов оборудования ($\bar{t}_{\text{отказ}}$ - среднее время ремонта позиции).

Предполагалось, что со стороны сборочной линии в потоке отказов отдельных позиций не вносятся дополнительные отказы.

При очередной смене состояния позиция будет работать в том случае, если:

- в предшествующем k -м накопителе есть хотя бы одно изделие ($NB_k \geq 1$);
- в последующем $(k+1)$ -м накопителе есть место для собранного изделия (текущая емкость $(k+1)$ -го накопителя $NB_{(k+1)}$ меньше его максимальной емкости $NA_{(k+1)}$; на позиции не произошел параметрический отказ (полученный зазор в соединении оказался в пределах допуска).

При выполнении всех этих условий текущее время TO_k и суммарное рабочее время на k -й позиции увеличивается на величину времени сборки изделия на k -ой позиции. По стандартной программе на ЭВМ разыгрывается случайное число X , распределенное по закону равной вероятности в интервале $[0,1]$ и по закону распределения Вейбулла рассчитывается время $t_{\text{отказ}}$.

Состояние «отказ-восстановление» возникает после работоспособного состояния, если время наступления очередного отказа оказалось меньше времени TO_k . Рассчитывается длительность восстановления k -ой позиции. При этом TO_k и суммарное время ремонта линии увеличиваются на время восстановления работоспособности позиции.

Состояние «ожидание изделия с предыдущей позиции» возникает, если в последующем $(k+1)$ -м накопителе есть место для собранного изделия, а в k -м накопителе нет ни одного изделия ($NB_k = 0$). В этом случае текущее время k -й позиции TO_k становится равным сумме текущего времени предыдущей позиции

$T_{0(k-1)}$ и времени на доставку изделия спутником L_k/V , где V - скорость перемещения спутника.

Состояние «ожидание свободного места для собранного изделия» возникает при полном заполнении последующего накопителя ($NB_{(k+1)} = NA_{(k+1)}$). Время наступления очередного отказа и время простоев из-за ожидания свободного места в накопителе увеличиваются на время простоя k -й позиции.

При автоматической сборке большие трудности вызывает обеспечение безотказности выполнения сопряжения деталей. Величина погрешности относительной ориентации деталей получается путем моделирования погрешностей составляющих звеньев размерной цепи и их суммирования. Параметрический отказ происходит в случае, если полученный зазор вышел за пределы поля допуска. В этом случае число бракованных изделий увеличивается на единицу. Текущее время k -й позиции T_{0k} увеличивается на величину времени, необходимого для удаления бракованного изделия с позиции.

Моделирование продолжается до тех пор, пока не закончится заданное время моделирования T . После чего определяется коэффициент технического использования:

$$\eta = \frac{\sum T_{РАБ}}{\sum T_{РАБ} + \sum T_{РЕМ} + \sum T_{НП} + \sum T_{П.О.}}, \text{ где}$$

$\sum T_{НП}$ - суммарное время наложенных простоев,

$\sum T_{П.О.}$ - суммарное время параметрических отказов,

$\sum T_{РАБ}$ - суммарное время работоспособного состояния,

$\sum T_{РЕМ}$ - суммарное время, затраченное на ремонт оборудования.

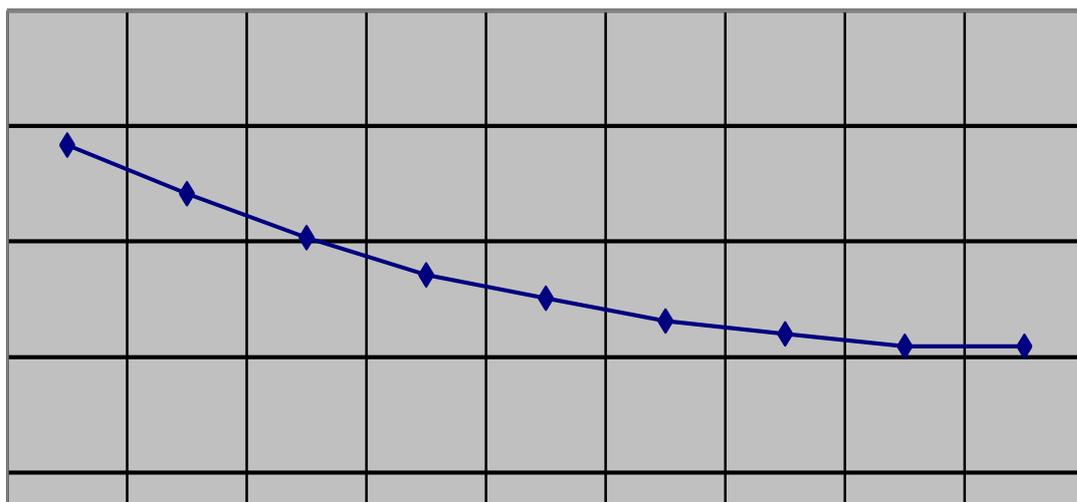
Важно оценить производственные возможности несинхронных многоучастковых линий уже на стадии проектирования, поскольку ошибки в определении ожидаемой производительности могут повлечь за собой дополнительные расходы средств и времени для внесения изменений по результатам промышленных испытаний либо неоправданное завышение стоимости линии вследствие неполной загрузки оборудования, увеличение габаритных размеров, производственных площадей и металлоемкости конструкции. Моделирование работы автоматизированных линий при достаточной точности исходных данных позволяет получить полную и объективную информацию об их функционировании, которая, в свою очередь, является исходной для расчета параметров исследуемой линии. Полученные результаты помогают прогнозировать основные характеристики оборудования на стадии проектирования с целью выбора оптимальных конструктивно-технологических решений, изучить влияние надежности отдельных узлов и модулей на эффективность работы линии в целом. Предлагаемый подход к определению оптимальных параметров гибких автоматизированных линий позволит решить вопрос о степени загрузки оборудования и выявить «узкие места» на стадии проектирования.

Автоматизированная линия сборки пяти различных типов валов коробок передач с возможностью перехода на другие типы, имеет модульную структуру и включает в себя модули сборки на базе роботов с числовым программным управлением, а также манипуляторов и механизмов с пневматическими и гидравлическими приводами, управляемых от программных контроллеров. Модули объединены несинхронным горизонтально замкнутым роликовым транспортером с множественными приспособлениями - спутниками.

Так как производительность линии в первую очередь зависит от надежности отдельных позиций, то было проанализировано влияние удельной длительности

простоев оборудования лимитирующей позиции B_i ($B_i = \frac{\bar{t}_{\text{оаи}}}{\bar{t}_{\text{оаа}}}$) на величину коэффициента технического использования (рисунок 1). За исходные данные для моделирования 11-позиционной сборочной линии были приняты: такт выпуска $\tau = 1,2$ мин; максимальная емкость накопителей между позициями $NB_k=5$, величина среднего времени работы $\bar{t}_{\text{оаа}}$ оставалась постоянной. При этом менялись величина среднего времени ремонта $\bar{t}_{\text{оаи}}$. Как видно из рисунка 1, необходимая производительность для рассматриваемого варианта линии обеспечивается лишь при значении удельной длительности простоев оборудования лимитирующей позиции B_i не выше 0,15. Следовательно, усредненные хронометражные данные о потерях времени из-за отказов нормализованных и типовых сборочных узлов, используемые для оценки надежности проектируемого сборочного оборудования, должны обязательно включать в себя значения как среднего времени безотказной работы узла $\bar{t}_{\text{оаа}}$, так и среднего времени на устранение отказа $\bar{t}_{\text{оаи}}$.

η
0.7



0 0,1 0,15 0,2 0,25 $B_i = \frac{\bar{t}_{\text{оаи}}}{\bar{t}_{\text{оаа}}}$

Рисунок 1. Влияние величины средней удельной длительности простоев B_i лимитирующей позиции на коэффициент технического использования η

Коэффициент технического использования зависит от емкости межпозиционных накопителей заделов, позволяющих позиции при очередной смене состояния работать в том случае, если в предшествующем накопителе есть хотя бы одно изделие, а в последующем накопителе есть место для собранного изделия. Полученная зависимость $\eta = f(Z)$ (рисунок 2) позволяет сделать вывод, что между позициями достаточно иметь расстояние для четырех-пяти спутников, так как дальнейшее увеличение задела

не приведет к повышению производительности. Расстояние между позициями принято $L=4$ м и определяется конструктивно.

η

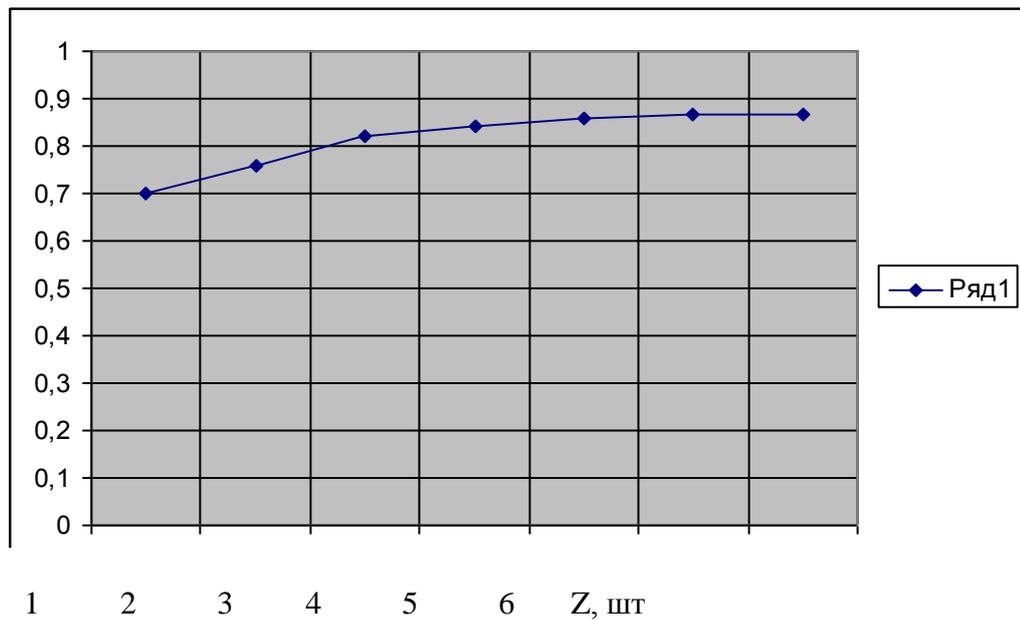


Рисунок 2. Зависимость коэффициента технического использования η несинхронной автоматической линии от емкости межпозиционного накопителя Z .

С целью определения оптимального количества спутников на линии в целом проводилось моделирование ее работы при разном числе спутников между позициями и разной скорости их перемещения (рисунок 3). Исследования показали, что в зависимости от программы выпуска в линии с принятыми параметрами одновременно должно находиться от 30 до 40 спутников, дальнейшее увеличение числа спутников неэффективно.

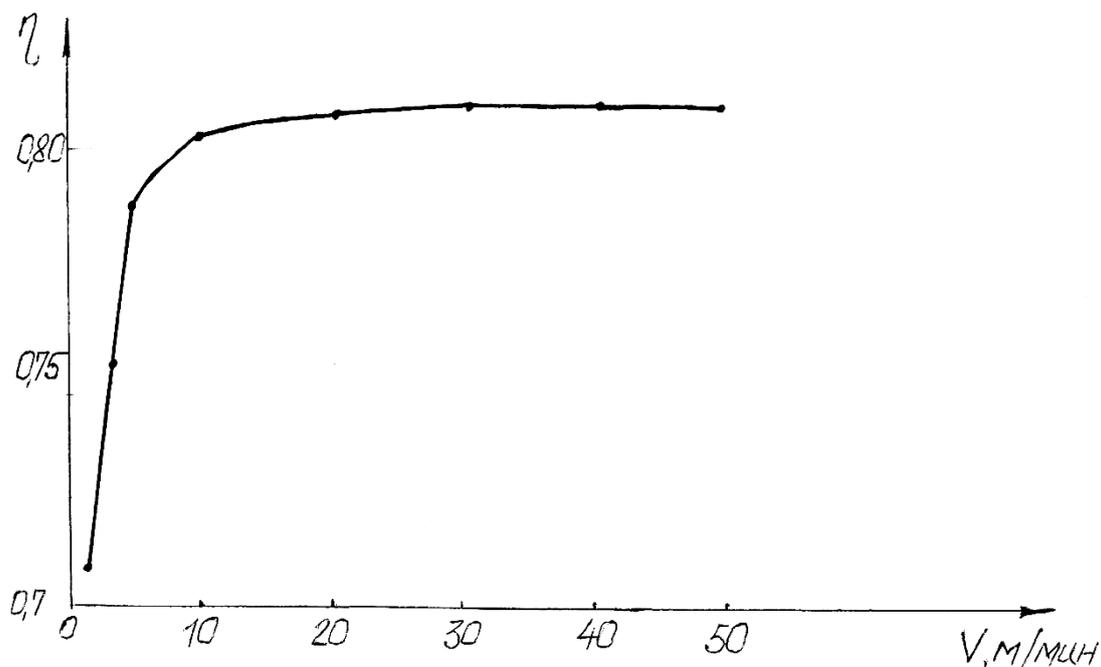


Рисунок 3. Зависимость коэффициента технического использования η несинхронной автоматической линии от скорости перемещения спутников

В случае опустошения накопителей между позициями время простоя позиции увеличивается на время перемещения спутника от предшествующей позиции к последующей, рассчитываемое как $\frac{L}{V}$, где V - скорость перемещения спутников. Если скорость перемещения спутников не обеспечивает своевременной подачи изделия на позицию, то происходит снижение величины коэффициента технического использования η . Исследования производительности действующих сборочных линий показало, что скорость перемещения спутников на них часто является заниженной. Моделирование дало возможность установить, что скорость перемещения спутников на проектируемой линии не должна быть ниже 12 м/мин. При такой скорости практически полностью исключается ее влияние на производительность линии.

С помощью моделирования можно оценить влияние параметрических отказов на производительность сборочной линии (рисунок 4). На всех одиннадцати позициях заданы в качестве исходных данных для сопрягаемых деталей математические ожидания, средние квадратичные отклонения диаметров, нижние и верхние границы допусков на зазор. На пяти позициях производится напрессовка шестрен на промежуточный вал. При крупносерийном и массовом производстве, отличающихся стабильностью процесса, рассеяние размеров сопрягаемых отверстия и вала не превышают $\pm 3\sigma$ от среднего значения совокупности.

Условие собираемости двух деталей соединения выражено величиной: $n_T = (S_{\max} - S_{\min}) / (6\sigma_i + 6\sigma_A)$, то есть отношением допуска зазора $(S_{\max} - S_{\min})$ к

удвоенной погрешности относительного положения центров отверстия и вала при выбранной схеме базирования ($\Delta = 6\sigma_i + 6\sigma_A$), где σ_i и σ_A - средние квадратичные отклонения параметров отверстия и вала.

η

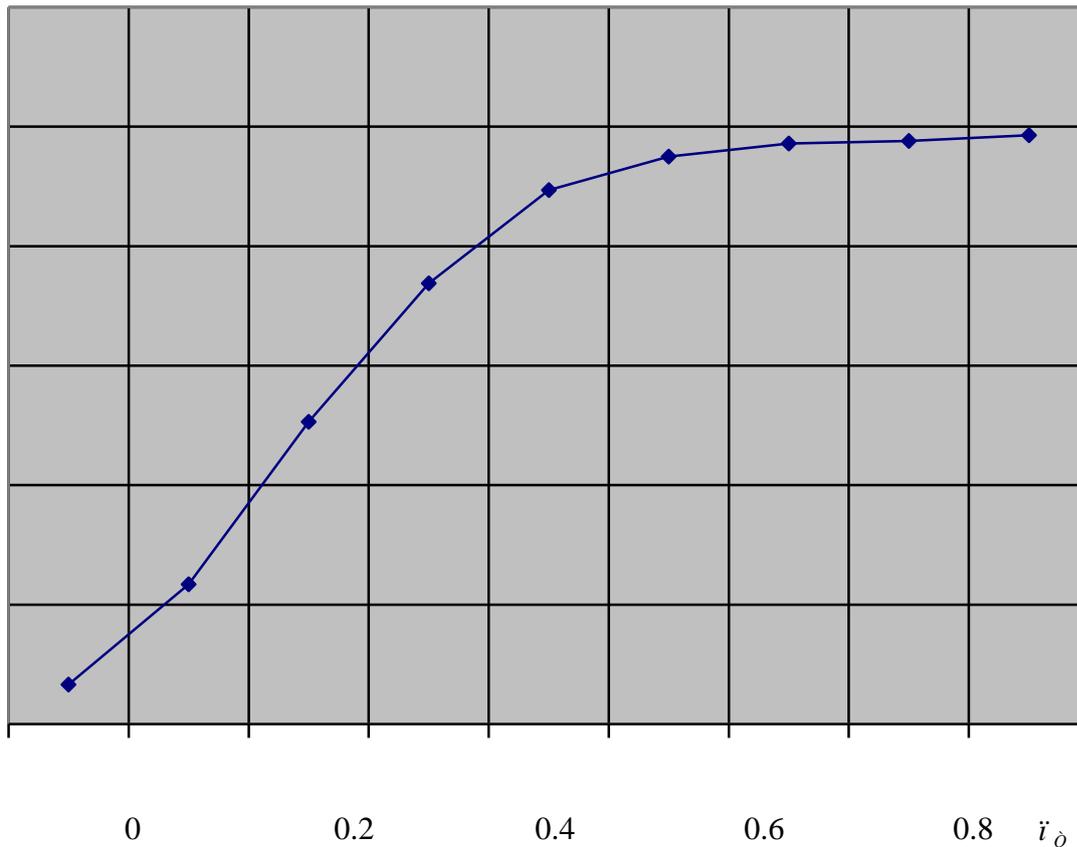


Рисунок 4. Влияние точности собираемых изделий на производительность линии

На рисунке 4 представлены результаты моделирования, проведенного с целью определения коэффициента технического использования η в зависимости от величины коэффициента собираемости i_{δ} , который показывает, что с уменьшением i_{δ} уменьшается η . Изменение i_{δ} от 1 до 0,5 дает изменение η всего на 10%, поэтому желательно для эффективного использования линии обеспечивать точность сопрягаемых деталей, необходимую для получения i_{δ} от 0,5 до 1.

Недоучет влияния параметрических отказов приводит к снижению производительности работающих гибких сборочных линий по сравнению с проектируемыми.

Разработанная программа моделирования работы гибких сборочных автоматизированных линий дает возможность путем изменения вариантов задачи выбрать количество позиций и тип связей между позициями линии сборки (жесткая, гибкая, комбинированная), определить концентрацию сборочных механизмов на каждой позиции, расположение заделов и их объемы, общее количество спутников, скорость их перемещения, компоновочные размеры линии и т.д. С использованием статистических данных о точности поступающих на сборку деталей возможно установить величину коэффициента технического использования η с учетом не только функциональных отказов, но и технологической и структурной надежности. Создание гибких автоматизированных систем невозможно без промышленных роботов.