

сутствие в России централизованного производителя сборочного оборудования; ограниченный характер использования выездных практик на заводы ВАЗ, КАМАЗ и другие, располагающие современным сборочным оборудованием.

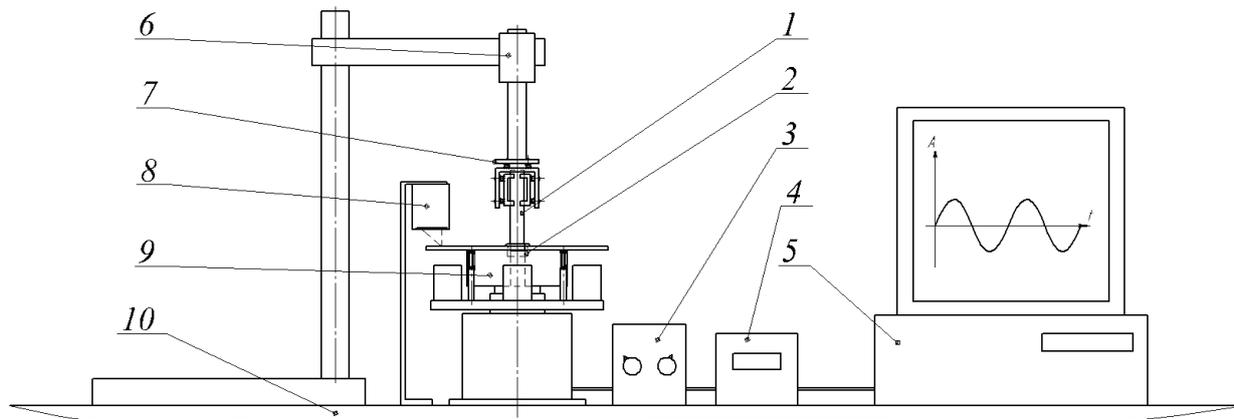


Рис. 3. Компоновка экспериментальной установки:

1 - устанавливаемая деталь, 2 - базовая деталь, 3 - генератор низкочастотных колебаний, 4 - электронный частотомер, 5 - ЭВМ, 6 - механизм вертикальной подачи схвата, 7 - адаптивный схват, 8 - лазерный датчик расстояния, 9 - виброопора базовой детали, 10 - опорная плита.

Вместе с тем, за последние годы расширилась база практик за счет оборонных предприятий, а также за счет смежных отраслей промышленности. Например, кафедра стала проводить практики на таких заводах, как «Метровагонмаш», АО «Электрозавод», Балашихинский завод гидроаппаратуры и ряде других. Опыт взаимодействия с промышленными предприятиями за последние годы показывает, что они испытывают все более острую потребность в специалистах в области сборки машин.

Предварительный выбор и оптимизация надежности автоматического сборочного оборудования

к.т.н. Аббясов В.М., к.т.н., доц. Бухтеева И.В., к.т.н., проф. Елхов П.Е.
МГТУ «МАМИ»

При проектировании технологических процессов сборки необходимо выбирать механосборочное оборудование с оптимальным уровнем надежности, которое обеспечит требуемую производительность и экономический эффект. Применение оборудования с низким уровнем надежности не даст того экономического эффекта, который нужен для нормального развития предприятий. Основная особенность выбора состава и структуры автоматического сборочного оборудования заключается в том, что замена не оправдавших себя в работе узлов и механизмов на более совершенные, а следовательно, более надежные, вызывает дополнительные затраты. Если учесть, что доля затрат на технологическое оборудование составляет 80-85% общих капитальных затрат, то любой нерациональный выбор оборудования разорителен. Оптимальная надежность – это экономический критерий надежности, позволяющий не только оценить экономический эффект повышения надежности вообще, но и выбрать наиболее выгодный метод ее повышения.

За показатели надежности приняты интенсивность отказов - $\lambda(t)$ и интенсивность восстановлений - $\mu(t)$. Вероятность безотказной работы $P(t)$ - это вероятность того, что в пределах заданного промежутка времени отказ не произойдет. Функции $\lambda(t)$ и $P(t)$ являются исчерпывающими характеристиками надежности узла. Однако следует иметь в виду еще одну характеристику – среднее время безотказной работы T_0 . Среднее время безотказной ра-

боты – это математическое ожидание времени работы узла до первого отказа. Для экспонен-

циального закона надежности $T = \frac{1}{\lambda}$. Экспоненциальный закон относится к однопараметрическим и позволяет весьма просто вычислять вероятность безотказной работы, поэтому широко применяется в расчетах надежности. При этом не разграничивают, относятся ли отказы к внезапным или постепенным. Процесс восстановления является пуассоновским потоком.

Создание высоконадежного оборудования должно основываться на исследовании эффективности. Под эффективностью понимается выполнение за заданный период наибольшего объема работы с минимальными материальными затратами. При этом учитываются лишь те составляющие стоимости оборудования, которые непосредственно связаны с надежностью в сфере разработки, производства и эксплуатации. Современный уровень развития науки и технологии позволяет создать сборочное оборудование с очень высокой надежностью, вопрос лишь в том, какие затраты и время потребуются для достижения поставленной цели. Затраты на создание сборочного модуля с высокой надежностью могут быть столь велики, что эффективность от повышения надежности не возместится в процессе его эксплуатации.

Поэтому при достижении требуемого уровня надежности прежде всего нужно исходить из получения наибольшей суммарной экономической эффективности с учетом затрат на разработку, производство и эксплуатацию и того положительного эффекта, который получится при использовании оборудования.

Суммарная экономическая эффективность использования сборочного оборудования складывается под влиянием двух противоположных затрат. С одной стороны, затраты на создание нового оборудования - C_H (на проектирование, материалы, производство, опытную отработку и др.) и затраты на эксплуатацию, на техническое обслуживание и ремонт, то есть затраты, связанные с поддержанием и восстановлением работоспособности механизмов, комплектующих модуль в процессе эксплуатации. Затраты на эксплуатацию $C_Э$ с течением времени t растут, так как происходит старение, изнашивание и выработка срока службы отдельных элементов узлов, что требует вложения возрастающих средств на восстановление утраченных свойств. Сумма затрат $C_H + C_Э$ на создание и эксплуатацию узла является отрицательной в балансе эффективности (кривая $C_H + C_Э$ на рис. 1). С другой стороны, использование нового модуля приносит прибыль (положительную экономическую эффективность) C_P , что демонстрирует кривая C_P на рис.1. Суммарная эффективность использования модуля с повышенной надежностью:

$$C(t) = C_H + C(t) + C_P(t) \quad (1)$$

При определенной продолжительности эксплуатации Ток затраты на создание нового модуля и эксплуатацию окупаются (Ток – срок окупаемости модуля). С этого момента использование оборудования приносит положительную эффективность, то есть $C(t) > 0$. Однако интенсивность роста прибыли постепенно снижается из-за увеличения эксплуатационных затрат и в момент времени $t = T_{PP}$ (соответствует абсциссе правой точки пересечения кривой $C(t)$ с осью абсцисс) эффективность $C(t) = 0$.

При $t > T_{PP}$ затраты на эксплуатацию больше прибыли и $C(t) < 0$.

Экономически целесообразно использовать оборудование в течение времени $T_Э$, равного проекции точки пересечения кривой $C(t)$ и кривой $C'(t)$ на оси абсцисс (рис. 1):

$$T_{\max} < T_Э < T_{PP},$$

где: T_{\max} – момент времени, в который эффективность использования оборудования максимальна.

На рис. 1 T_{\max} соответствует абсциссе точки пересечения кривых $C'_Э + C'_Н$ и C' .

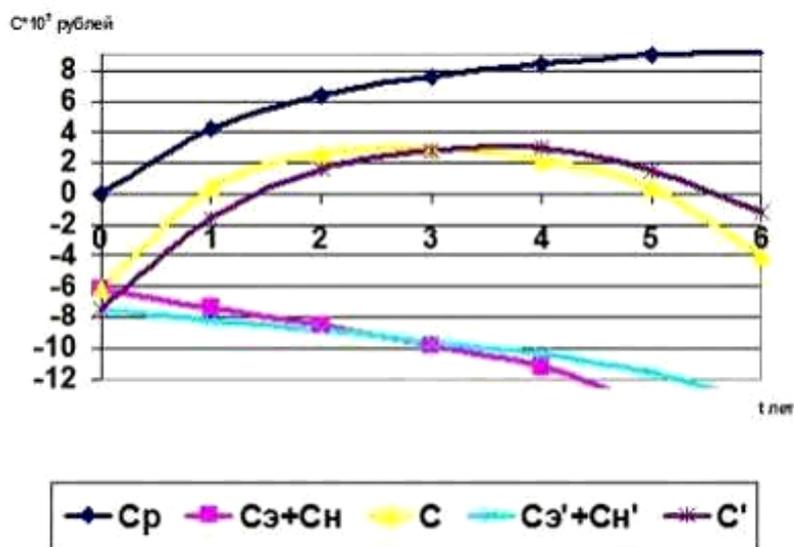


Рис. 1. Зависимость экономической эффективности оборудования от времени.

Экономическая целесообразность использования оборудования определяется площадью под кривой $C(t)$ на интервале ее точек пересечения с осью абсцисс. На экономическую целесообразность влияют характер изменения затрат на эксплуатацию (система технического обслуживания и ремонта) и начальные затраты на создание оборудования. Например, затраты на создание модуля с большей надежностью (кривая $C'_Э + C'_Н$) увеличены из-за применения узлов с повышенными характеристиками надежности, увеличения периода опытной отработки оборудования, применения дублирования элементов и т.п. Эти мероприятия снижают затраты на эксплуатацию из-за уменьшения числа ремонтов и восстановлений.

В результате увеличивается суммарная эффективность, $C(t) > C(t)$ (кривая $C'_Э + C'_Н$ после точки пересечения выше кривой $C_Э + C_Н$), срок окупаемости и время $T_Э$ экономически целесообразной эксплуатации оборудования, которое соответствует абсциссе точки пересечения кривых C и C' . В этом случае экономическая целесообразность повышения надежности оправдана, так как после точки пересечения кривая C' выше кривой C .

Следовательно, при оценке разнообразных возможностей повышения и обеспечения надежности сборочного оборудования экономическая эффективность должна являться основным критерием принятия конструктивных решений и разработки системы технического обслуживания.

Надежность всей сборочной позиции будет определяться надежностью установленного на ней оборудования. Для расчета надежности самого сложного модуля сборки достаточно знать состав входящих в него элементов оборудования, их число, статические характеристики показателей надежности каждого элемента, которые берутся по данным эксплуатации сборочного оборудования. Например, модуль сборки вторичного вала КПП большегрузных автомобилей состоит из мостового робота, накопителя сменных схватов, пресса, четырех магазинов с поворотными столами для устанавливаемых деталей, двух фиксирующих устройств, стопорного устройства, механизма кодирования, устройства смазки.

В свою очередь это оборудование можно представить как систему, состоящую из « n »

последовательно соединенных элементов (поворотных столов, механизмов зажима и фиксации, ориентирующих устройств, манипуляторов, сборочных головок, электрооборудования, гидро- и пневмосистем и т.д.).

При решении задачи повышения надежности позиции повышением надежности основных комплектующих узлов конструкторско-производственным способом при минимальных суммарных затратах на производство и эксплуатацию оборудования, то с помощью разработанных конкретных методов повышения надежности каждого комплектующего узла стоимость C_i узла с повышенной вероятностью безотказной работы определяется по формуле:

$$C_i = C_{o_i} \left(\frac{\ln P_{o_i}}{\ln P_i} \right)^{a_i} \quad (2)$$

где: P_{o_i} - исходная вероятность безотказной работы узла;

P_i – новая вероятность безотказной работы узла после ее повышения;

C_{o_i} - стоимость узла до повышения надежности;

a_i - коэффициент, отражающий степень новизны нового варианта по сравнению с его прототипом.

Коэффициентом a_i можно характеризовать эффективность вложения средств для повышения надежности. Чем он меньше, тем меньше необходимо затратить средств для достижения заданной надежности, что означает увеличение эффективности вложения средств. При экспоненциальном законе распределения коэффициент a_i может принимать только положительные значения, что соответствует его качественному определению, связанному с эффективностью вложения средств в повышение надежности. Если $a_i > 0$, то повышение надежности сопряжено с дополнительными затратами, вследствие чего стоимость оборудования увеличивается. В этом случае затраты по повышению надежности окупаются увеличением срока службы не сразу, а лишь через некоторое время τ , называемым сроком окупаемости.

Коэффициент a_i должен выбираться так, чтобы наилучшим способом можно было аппроксимировать реальную зависимость стоимости от надежности. Дополнительные затраты, определяющие этот коэффициент, зависят от разработанных способов повышения надежности данного узла и от потенциальных возможностей наиболее эффективного применения этих способов на конкретном производстве. Этот коэффициент характеризует эффективность вложения средств для повышения надежности. Расчет этого коэффициента ведется по формуле:

$$a = \frac{\ln \frac{C}{C_o}}{\ln \frac{\ln P_o}{\ln P}} \quad (3)$$

Так как повышение надежности сопряжено с дополнительными затратами, то $a \geq 0$. Затраты окупаются с увеличением срока службы не сразу, а лишь через некоторое время.

Срок окупаемости - τ определяется из зависимости:

$$\tau = \frac{\ln \frac{C}{C_o}}{\lambda_o - \lambda} \quad (4)$$

где: λ_o и λ - интенсивности отказов, соответствующие надежности P_0 и P .

Для повышения эффективности сборочного производства, увеличения его надежности необходимо применять высокоэффективные конструкции перенастраиваемого и программируемого сборочного оборудования и оснастки, модульные конструкции специализированных и адаптивных сборочных роботов, гибкие модули механической части роботов, совершенствовать устройства управления и программного обеспечения, использовать слесарно-сборочные инструменты высокого качества, высокоэффективные конструкции средств механизации и автоматизации для выполнения вспомогательных, транспортных, складских и погрузочно-разгрузочных работ в сборочном производстве.

В значительной степени определяют надежность оборудования пневматические, электромеханические и гидравлические приводы.

Сборочные головки – основные узлы модулей. При сборке узлов и деталей, скрепляемых резьбовыми соединениями с автоматическим наживлением, необходимо обеспечивать высокую точность взаимной ориентации осей резьбовых отверстий и крепежных деталей. С целью повышения надежности процесса наживления и исключения возрастания момента сопротивления в резьбе при завинчивании, возникающего от перекосов и смещения осей. Конструкция плавающего крепления гайковерта позволяет надежно завинчивать и затягивать резьбовые детали, расширить поле допусков угловых и линейных смещений осей резьбового отверстия и крепежной детали. Для обеспечения гарантированного наживления резьбовых деталей можно использовать специальные механизмы, обеспечивающие автоматический поиск резьбовой деталью резьбового отверстия. Поиск оптимального варианта оборудования осуществляется по специально разработанной методике, оптимизирующей его надежность. В случае отсутствия оборудования с заданной характеристикой надежности по этой методике можно получить задание на поиск необходимого состава. Поиск оптимальной надежности по методике усложняют ограничения, налагаемые существующими характеристиками оборудования, но в конечном счете системный подход позволит повысить качество выбора при подготовке производства.

Для объективной и достоверной оценки надежности сборочного оборудования необходима система сбора и обработки информации, которая охватывает проектные организации и сборочное производство, ремонтные предприятия и обеспечивает получение полных, сопоставляемых и объективных данных о работоспособности узлов сборочных модулей, оперативная обработка данных и получение результатов в форме, удобной для анализа и принятия решений.

Информация, полученная на автозаводах, НПО «Автопромсборка» была тщательно классифицирована по однородности и срокам наблюдения. При классификации учитывалась однородность сборочных модулей. При определении надежности компонентов модулей сборки признаком однотипности являлся год выпуска и завод-изготовитель. Вся полученная информация оформлялась в соответствии с действующими ГОСТами.

Для выяснения закономерностей ошибок и достоверной оценки надежности в соответствии с предельной теоремой теории вероятностей проведено большое число испытаний и измерений. Проведенная работа включала сокращенный комплекс испытаний и по их результатам были сформулированы выводы о всей генеральной совокупности. Была определена достоверная оценка полученной выборки: определялись эмпирические функции распределения и статистики, а затем теоретические функции распределения с помощью различных критериев согласия.

Проводилось хронометрирование в процессе действующего производства для контроля заданных показателей надежности.

Существуют различные методы проверки законов распределения, однако обобщенной методики проверки по статистическим данным не существует. Поэтому в инженерной прак-

тике применяют простые и наглядные графические методы, при которых совпадение или несовпадение статистического и теоретического распределений оценивается по графикам. С помощью этих методов были обработаны все полученные в результате обследования действующего оборудования в условиях производства статистические данные о надежности отдельных узлов. На основании этих данных были рассчитаны показатели надежности сборочных головок, роботов, манипуляторов, загрузочных устройств и т.п.

Срок окупаемости τ через t единиц времени:

$$\tau = \frac{a \ln \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\lambda_0 - \lambda} \quad (5)$$

С помощью этой формулы решается задача определения τ в случае, когда уже разработаны конкретные способы повышения надежности в условиях производства. Но целесообразно предварительно рассчитывать экономический эффект от вложения средств на повышение надежности. Для этой цели воспользуемся формулой (3).

Так как средний срок службы нового модуля равен $T = \frac{1}{\lambda}$, то делением левой и правой частей на T получаем выражение:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{a \lambda \ln \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\lambda_0 - \lambda} \quad (6)$$

Отсюда:

$$a = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1)}{\ln \frac{\lambda_0}{\lambda}} \quad (7)$$

На рис. 2 представлена зависимость a от $\frac{\tau}{T}$ при различных λ и фиксированном λ_0 .

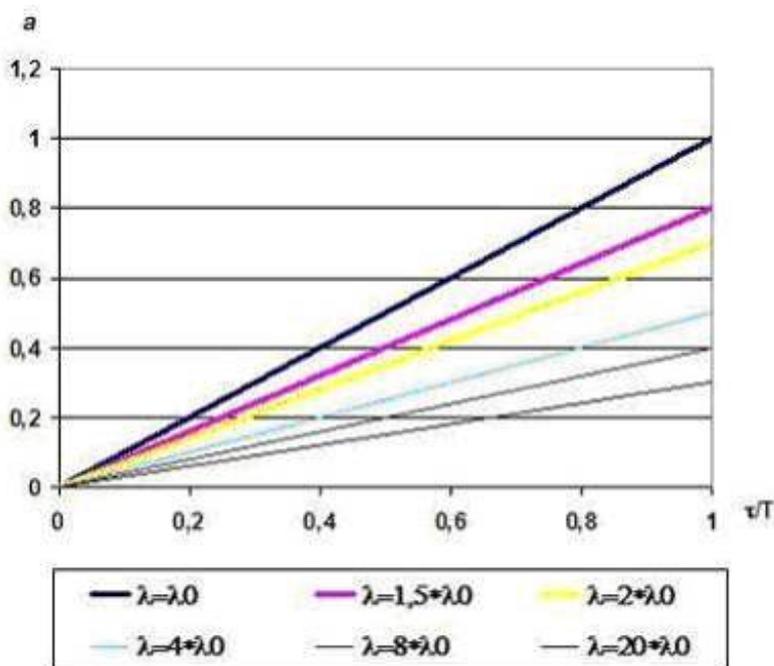


Рис. 2. Зависимость коэффициента a от отношения τ/T .

При $\lambda \leq \lambda_0$: $\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right) \geq \ln \frac{\lambda_0}{\lambda}$.

Из формулы (7) следует, что срок окупаемости затрат τ по повышению надежности

будет меньше среднего срока службы нового модуля всегда при $a < 1$: $\frac{\tau}{T} < 1$ при $a < 1$. Экономический эффект при этом за время эксплуатации модуля, равное среднему сроку службы T , будет всегда положительным.

Зависимость функции стоимости C от надежности P для различных значений коэффициента a представлена на рис. 3.

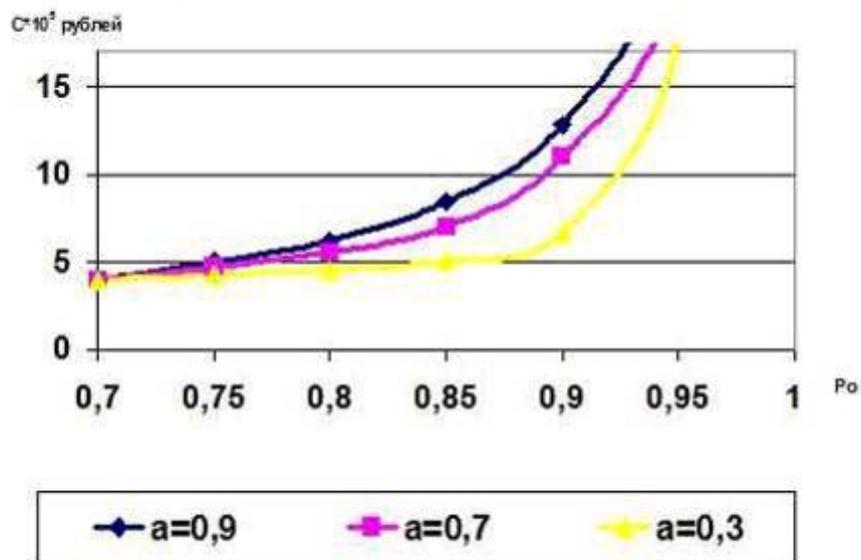


Рис. 3. Зависимость функции C от надежности P при различных состояниях a .

Создание высоконадежного оборудования невозможно без определения норм надежности по основным показателям, значения которых должны указываться в технических условиях. Под нормами надежности принимают перечень показателей и их численные значения для оценки надежности сборочного оборудования конкретного типа, предназначенного для работы в заданных условиях эксплуатации. Показатели надежности должны устанавливаться на стадиях разработки технического задания на проектирование. Нормированию подлежит в первую очередь вероятность безотказной работы $P(t)$. В настоящее время в различных отраслях промышленности разработаны классификаторы, которые разбивают основные узлы и элементы сборочного оборудования на категории по допустимым значениям вероятности исправной работы.

Определять оптимальные требования к надежности сборочного модуля и его элементам необходимо потому, что повышение надежности, как правило, связано с ростом экономических затрат на разработку и производство и уменьшением расходов на ремонт и техническое обслуживание. Для оптимизации требований к надежности необходимо на основе анализа условий производства и принципов эксплуатации оборудования выбрать показатель эффективности (стоимость, производительность, ремонтпригодность, время работы и изготовления и т.п.).

Основными показателями эффективности оборудования являются производительность и экономичность. С повышением надежности возрастают затраты в процессе проектирования, изготовления и отработки оборудования и снижаются затраты на эксплуатацию вследствие уменьшения числа отказов. Эти две противоположные тенденции создают предпосылки для появления экстремума показателей экономической эффективности, которому соответствует определенное (оптимальное) значение вероятности безотказной работы. Таким

образом, задача нормирования надежности сводится к исследованию суммарных приведенных затрат в зависимости от вероятности безотказной работы. Функциональная взаимосвязь приведенных затрат с вероятностью безотказной работы оборудования имеет вид:

$$\mathcal{E}(P(t)) = C_{II}(P(t)) + C_{\mathcal{E}}(P(t)) \quad (8)$$

где: $P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$C_{II}(P(t))$ – приведенные затраты, связанные с обеспечением разработки и производства оборудования с вероятностью безотказной работы $P(t)$;

$C_{\mathcal{E}}(P(t))$ - ежегодные приведенные затраты, связанные с техническим обслуживанием во время эксплуатации.

После того как найдены оптимальные по какому-либо критерию показатели надежности сборочного модуля, возникает задача распределения требований к этим показателям между элементами, составляющими модуль, особенно если их производят разные предприятия.

Задача нормирования показателей надежности элементов модуля формулируется так: определить такие значения требуемых уровней надежности основных составляющих модуль элементов, чтобы при минимальных затратах можно было создать модуль с надежностью, не меньшей заданной.

Первым шагом на пути решения поставленной задачи является анализ компоновки модуля и определение его основных составляющих элементов, чтобы показатели его надежности можно было определить по зависимости

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad (9)$$

где: n – число элементов модуля;

P_i -показатель надежности i -го элемента.

Затем выбирается функция затрат на производство и эксплуатацию каждого элемента. Оптимальный показатель требуемой надежности линейно зависит от относительной нормированной стоимости повышения надежности данного элемента при его отработке, то есть чем дороже обходится повышение надежности, тем ниже должно быть требуемое ее значение.

Для определения оптимального распределения вероятности безотказной работы между комплектующими узлами можно использовать метод уравнивания его чувствительности по узлам. Чувствительностью оборудования по i -му узлу называется скорость изменения вероятности P безотказной работы модуля в зависимости от изменения его стоимости C при условии изменения этих величин только за счет вероятности безотказной работы i -го узла. Чувствительность модуля по i -му узлу будет:

$$l_i = \frac{P \left(\ln \frac{1}{P_i} \right)^{a_i+1}}{a_i C_{0_i} \left(\ln \frac{1}{P_{0_i}} \right)^{a_i}} \quad (10)$$

Принятый метод уравнивания чувствительности модуля по отдельным комплектующим узлам заключается в определении того, как будет изменяться P - вероятность безотказной работы модуля в зависимости от изменения его стоимости при изменении вероятности безотказной работы любого из основных комплектующих узлов. Оптимальным распределением уровня вероятности безотказной работы модуля P между отдельными комплектующими узлами будет такое, при котором чувствительности модуля по этим узлам одина-

ковы и равны оптимальной чувствительности $l_i = l_{opt}$, соответствующей значению требуемого уровня безотказной работы.

На рис. 4 построены кривые зависимостей $l_i = f(P_i)$ для модуля сборки валов КПП грузового автомобиля.

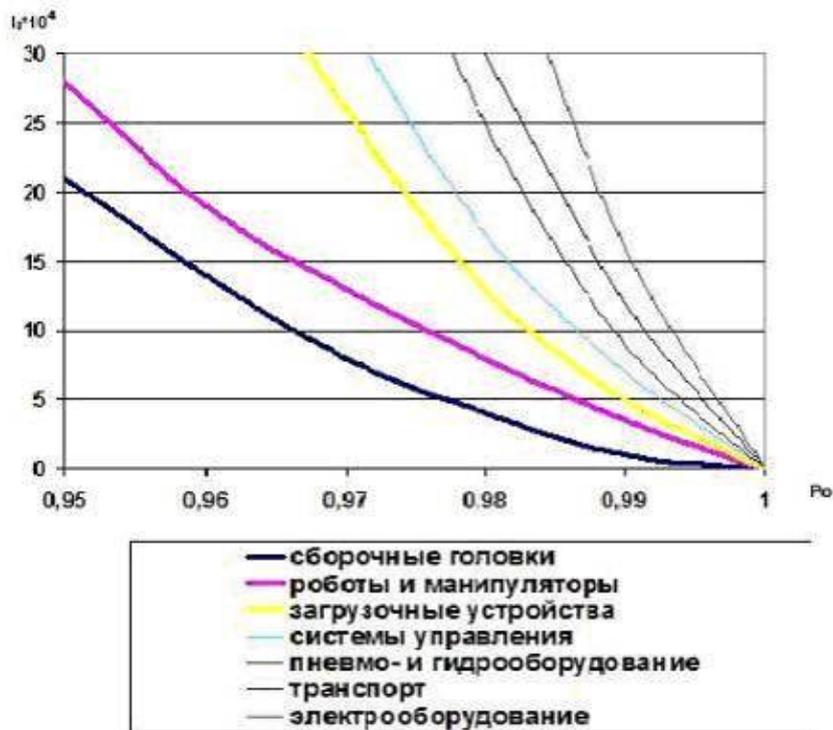


Рис. 4. Зависимость чувствительности l_i модуля сборки валов КПП по комплектующим его узлам от вероятности безотказной работы P_0 .

Вероятность безотказной работы сборочного модуля, определенная с помощью хронометражных данных о потерях времени из-за отказов нормализованных и типовых узлов сборочных модулей НПО «Автопромсборка», примерно равна 0,87. Искомые значения P_i комплектующих узлов подбираются графо-аналитическим способом так, чтобы чувствительности l_i были равны между собой и равны такой оптимальной чувствительности l_{opt} , при

которой вероятность безотказной работы модуля равна 0,87: $P = \prod_{i=1}^n P_i = 0,87$.

Для этого на графике (рис. 4) проводится прямая, параллельная оси абсцисс l_i . На пересечении этой прямой с кривыми $l_i = f(P_i)$ определяются значения P_i по абсциссам полученных точек пересечения, их произведение будет соответствовать вероятности безотказной работы модуля в целом. Если полученное значение не устраивает проектировщика, проводится следующая линия, параллельная оси абсцисс, выше или ниже предыдущей, в зависимости от поставленной цели – повысить или понизить значение уровня надежности.

Потери в общем балансе времени простоев сборочного модуля составляют из-за отказов: сборочных головок – 25%, роботов и манипуляторов – 20%, загрузочных устройств – 16%, системы управления – 14%, пневмо- и гидрооборудования – 10%, транспорта – 8% и электрооборудования – 7%. Эти данные получены при обследовании работы сборочных линий на заводах.

Стоимость узла в целом равна сумме стоимостей составляющих узлов:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n C_{0_i} \left(\frac{\ln P_{0_i}}{\ln P_i} \right)^{a_i} \quad (11)$$

Оптимальный уровень надежности модуля сборки валов коробки передач был получен из условия минимума общих затрат, связанных с повышением надежности комплектующих узлов и эксплуатацией этого модуля. Был построен график зависимости стоимости затрат на производство модуля C и стоимости эксплуатации модуля $C_э$ от величины вероятности безотказной работы P . При суммировании ординат составляющих функций $C = f(P)$ и $C_э = f(P)$ получена кривая $C_э = f(P)$ с минимумом, соответствующим оптимальному значению вероятности безотказной работы модуля (рис. 5).

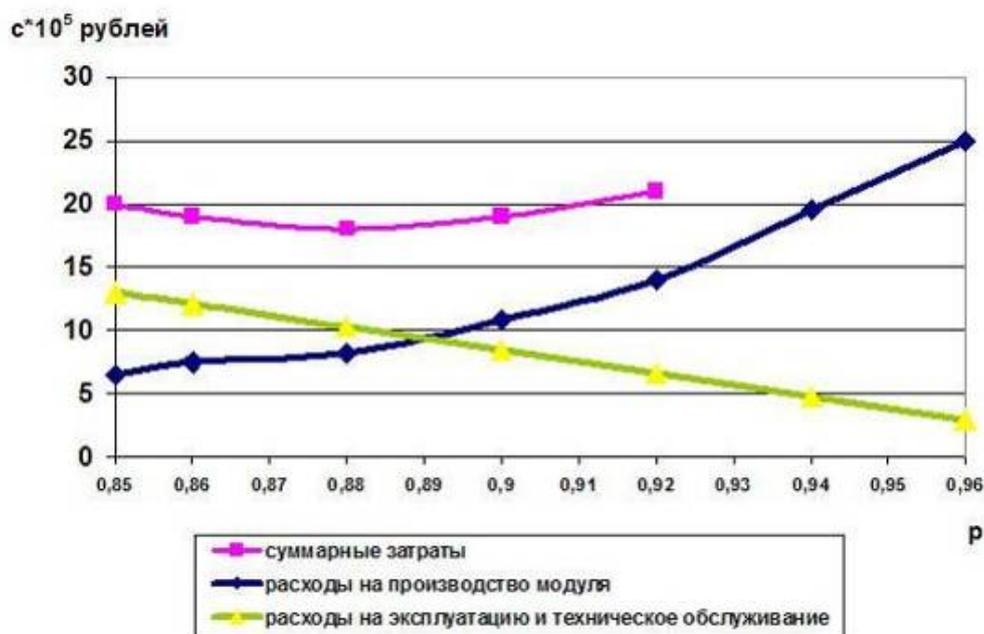


Рис. 5. Зависимость затрат связанных с производством и эксплуатацией роботизированного модуля сборки от уровня вероятности его безотказной работы.

Заключение

При компоновке автоматических линий из сборочных модулей необходимо определять требования к надежности отдельных встраиваемых модулей с учетом их оптимальной надежности. Для проверки соответствия этих требований оптимальному уровню надежности, наиболее экономически выгодному для встраиваемого сборочного модуля, необходимо рассчитать оптимальные уровни вероятности безотказной работы для компоновок модулей с различной концентрацией операций. Эффект увеличения концентрации операций достигается увеличением числа эквивалентных рабочих позиций.

Определяется стоимость каждого модуля при условии повышения их надежности до задаваемого уровня. По полученным значениям стоимости модулей и эксплуатационным расходам при различных уровнях надежности находится значение оптимального уровня надежности каждого модуля.

Литература

1. Бухтеева И.В, Лисовский А.М.. Зависимость надежности автоматических линий от затрат на оборудование и эксплуатацию. Механизация и автоматизация производства, 1978 г. №11.
2. Проников А.С., Солодов М.Д. Методы оценки надежности сборочных операций. Методические рекомендации. – М., изд. Госстандарта СССР, 1980.