

М 152359
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

К. т. н. ВОЛЧКЕВИЧ Л. И.

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА ТРЕБОВАНИЙ
К ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ,
МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ
В АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(Специальность 05.198 — Автоматизация производственных процессов в машиностроении)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный консультант —
лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор Шаумян Г. А.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Васильев В. С.,
доктор технических наук, профессор Рабинович А. Н.,
доктор технических наук, профессор Якушев А. И.

Ведущее предприятие — указано в решении Ученого Совета.

Автореферат

972

Защита диссертации

72

на заседании Ученого Совета

19

по механизации производства

ресурсов: Москва,

С диссертацией

Ученый секретарь

К. Т.

3.

M152359

Министерство высшего и среднего специального образования

С С С Р

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

к.т.н. Волчкевич Л.И.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА ТРЕБОВАНИЙ
К ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ,
МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ В АВТОМАТИЧЕСКИХ
ЛИНИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Специальность 05.198

("Автоматизация производственных
процессов в машиностроении")

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1971 г.

М 152.359
Н.В. М. И. У. И. М. Н. Э. Баумана



1152359

Волчкевич Л.И. Основы те

Все потенциальные возможности автоматизации в повышении производительности машин и производительности труда могут быть реализованы только при условии, если механизмы и устройства, замещающие функции человека, будут иметь высокую надежность в работе. Решение проблемы надежности требует не только огромной конструкторской и экспериментальной работы, но и больших научных обобщений. Отсюда формирование новой отрасли науки о машинах — теории надежности рабочих машин (станков, автоматов, автоматических линий).

Целевым назначением рабочей машины является обработка, контроль, сборка продукции заданного качества и количества при наименьших затратах общественного труда. Надежность машин должна рассматриваться как степень реализации возможностей выпуска продукции, заложенных в технологическом процессе и конструкциях машин, как мера потерь производительности машин и производительности труда. Поэтому проблема надежности рабочих машин — это проблема высокопроизводительного и высокоэффективного использования станков, автоматов и автоматических линий.

Фундамент теории надежности рабочих машин был заложен еще в 30-х годах с развитием отечественной науки о машинах, таких ее направлений, как а) теория производительности (Г.А.Шаумян); б) теория точности обработки (А.А.Зыков, А.Б.Яхин, А.П.Соколовский, В.М.Кован и др.); в) теории точности механизмов (Н.Г.Бруевич); г) теории износа и долговечности машин (В.Н.Трейер, Д.Н.Решетов, М.М.Хрудов и др.).

Работы советских ученых позволили уже к 50-м годам а) сформулировать проблему долговечности и надежности как одну из проблем комплексной автоматизации (Г.А.Шаумян, А.П.Владзиевский, Ю.Б.Эрпшер); в) выявить взаимосвязь эксплуатационной надежности с производительностью машин (Г.А.Шаумян, А.П.Владзиевский, Ю.Б. Эрпшер, А.А.Левин); в) раскрыть вероятностные закономерности функционирования автоматов и линий как с точки зрения надежности качества изделий (А.Б. Яхин, А.П.Соколовский, В.М.Кован, Н.А.Бородачев), так и на-

дежности срабатывания механизмов (А.П. Владзиевский, Ю.Б. Эрпшер, А.А. Левин); г) установить количественные показатели надежности (Г.А. Шаумян, Н.Г. Бруевич, А.П. Владзиевский, Д.Н. Решетов, А.С. Проников); д) разработать методы прогнозирования уровня надежности работы механизмов (А.П. Владзиевский, Ю.Б. Эрпшер) и качества обработки (В.М. Кован, А.П. Соколовский, И.А. Бородачев); е) решить многие задачи расчета и выбора структурных, конструктивных, технологических параметров машин и их механизмов с точки зрения их долговечности и надежности (Г.А. Шаумян, В.Н. Трейер, Д.Н. Решетов, Ю.Б. Эрпшер, А.С. Проников, А.А. Левин, Х.Б. Кордонский и др.); ж) разработать методы анализа и оценки надежности машин и долговечности их элементов, точности и стабильности обработки и т.д.

В начале 60-х годов получила широкое развитие математическая теория надежности радиоэлектронной аппаратуры, многие положения которой были распространены на другие технические системы, в том числе на рабочие машины. Ее развитие не повлияло заметно на прогресс конструирования и эксплуатации станков, автоматов и автоматических линий, а имело результатом, в первую очередь, заимствование обширного математического аппарата для учета и описания отказов, что создает предпосылки для дальнейшего развития тех научных положений о надежности машин, которые выработаны в рамках теории производительности, точности, износа и долговечности.

Анализируя тенденции развития теории надежности машин, можно провести близкую аналогию с наукой о точности, которая, как известно, имеет два основных направления: теория ожидаемой точности (технология машинотроения и приборостроения) и теория требуемой точности (теория взаимозаменяемости). Их общей основой является метрология — наука о методах и средствах измерения точности.

Аналогичные направления можно проследить и в теории надежности. Наиболее интенсивно развивается сейчас направление, которое можно назвать "метрологическим" (установление количественных показателей надежности, анализ их взаимосвязи, разработка методов учета и описания отказов). Много сделано в теории ожидаемой надежности, основная за-

дача которой – прогнозирование уровня надежности проектируемого оборудования. Что касается теории требуемой надежности, то она практически не разработана, т.е. при огромном количестве всевозможных работ по теории надежности в ней отсутствует научное направление, эквивалентное по научной и практической значимости теории допусков и взаимозаменяемости.

Сложилось парадоксальное положение. Словесно надежность признается одним из важнейших показателей качества машин, наряду с точностью обработки, жесткостью, виброустойчивостью и т.д. Но по всем этим показателям давно известны и количественные требования – допуски. Так, при сдаче-приемке машин и линий существуют нормы точности, жесткости, геометрической точности, нормируются даже шум и вибрации. Нет только норм надежности, потому что не существует ни теоретического обоснования, ни методики расчета, ни формул по которым можно было бы эти нормы рассчитать.

Настоящая работа является первой в машиностроении попыткой разработки теории и методов расчета требований к надежности машин и их механизмов с доведением результатов до конкретных расчетов по конкретным видам оборудования.

Это позволяет создать научную основу для расчета допусков на надежность по аналогии с допусками на точность, создания системы допусков на надежность, классификации уровней надежности и т.д.

Задача решалась применительно к самым сложным системам машин – автоматическим линиям, где проблема надежности стоит наиболее остро, а явления надежности весьма специфичны.

Работа выполнена на кафедре "Станки и автоматы" МВТУ им.Баумана под руководством проф.д.т.н. Шаумяна Г.А.Теоретической основой работы послужили труды советских ученых в области теории производительности машин и труда, а также теории надежности радиоэлектроники, допусков и функциональной взаимозаменяемости, теории точности, теории подобия и т.д. Экспериментальная часть работы включала: а) исследования работоспособности автоматических линий в условиях эксплуатации б) математическое моделирование работы линий; в) анализ ра-

ботоспособности отдельных механизмов в лабораторных условиях.

1. Постановка задачи

Для автоматических линий надежность есть способность к бесперебойному выпуску годной продукции в заданном количестве в течение всего срока службы. Линия находится в состоянии отказа, если либо не выдается продукция из-за несрабатывания механизмов, устройств или инструмента, либо выпущенная продукция является бракованной.

Исследования работоспособности, проведенные в настоящей работе, показали, что сущность явлений надежности автоматических линий и причины отказов весьма специфичны.

В универсальных станках первопричинами отказов являются, как правило, процессы изнашивания и усталости конструктивных материалов, поэтому проблему надежности универсальных станков часто сводят к повышению долговечности отдельных деталей и сопряжений (шпиндели, направляющие суппортов и т.д.). В автоматах и автоматических линиях эти факторы не являются провалирующими: как показали исследования, поломки составляют не более 1-3% общего количества отказов; до 80-90% отказов связано с несрабатыванием механизмов малых ходов и управления из-за неполного замещения функций человека при автоматизации и нестабильности внешних и внутренних рабочих параметров (разброс размеров заготовок и конструктивных элементов машин, нестабильность их перемещений; колебания рабочих усилий и температуры окружающей среды, рабочих жидкостей и газов; наличие стружки и других отходов; неравномерность коэффициентов трения, жесткости, скорости перемещения, инерционных усилий и т.д.).

Эти факторы носят в основном циклический характер, благоприятное сочетание их случайных значений означает нормальное срабатывание, неблагоприятное - отказ. Изнашивание является дестабилизирующим фактором этих случайных процессов. Однако даже у давно работающих линий до 90-95% отказов не требуют для своего устранения ни разборки с заменой или без замены деталей, ни даже регулировки. Поэтому для автоматических линий характерны высокая частота отказов (среднее время безотказной работы $M_{ср} = 7 - 10$ мин) и малая

средняя длительность их устранения ($\theta_{cp} = 2-3$ мин), при относительно стабильном уровне эксплуатационной надежности во времени, так как большинство параметров, определяющих уровень надежности (стружка, рабочие усилия, нестабильность заготовок, колебания температуры и т.д.) во времени меняются мало. Так, автоматическая линия "Блок-2" имела в 1961 году коэффициент технического использования 0,85; в 1966 году - 0,86.

Требования к надежности могут ставиться качественно и количественно, быть обобщенными и конкретными. Количественные требования к показателям надежности конкретных конструкций, которые могут сравниваться с фактическими значениями этих показателей, есть допуски на надежность.

Предельными показателями надежности называются два предельных значения контролируемого показателя надежности, между которыми должно находиться действительное значение этого показателя.

Допуском на надежность называется разность между предельными значениями контролируемого показателя надежности, исходя из функционального назначения элемента или системы.

В качестве контролируемых показателей эксплуатационной надежности в работе приняты:

1) для автоматических линий в целом - коэффициент технического использования $\eta_{ал}$, численно равный доле времени работы линии в процессе эксплуатации при обеспечении ее всем необходимым;

2) для станков, встроенных в линии - коэффициент использования $\eta_{ст}$ и внецикловые потери (технические простои, приходящиеся на одно изделия $\sum t_n$ или единицу времени безотказной работы "В");

3) для механизмов и устройств - внецикловые потери t_n и среднее количество нормальных срабатываний между двумя отказами k_n (средняя наработка на отказ).

Определения допусков на надежность по форме идентичны соответствующим определениям, принятым в теории точно-

сти¹⁾; однако физическая сущность их различна, так как:

1. Основным объектом постановки допусков на точность являются геометрические размеры и форма конструктивных элементов — деталей машин. Понятие надежности, наоборот, относится прежде всего к системе как совокупности множества элементов. Поэтому допуски на надежность должны назначаться прежде всего к автоматическим линиям в целом, машинам и их механизмам, но не к отдельным деталям машин.

2. Допуски на точность ставятся, как правило, независимо для отдельных деталей и сопряжений, исходя из их индивидуальной функциональной взаимозаменяемости. Допуски на надежность систем в целом и их составляющих всегда взаимосвязаны.

3. Допуски на точность ставятся по отношению к конкретным параметрам (размерам), допуски на надежность ставятся к случайным величинам (как правило, к их математическому ожиданию), и поэтому имеют вероятностный смысл.

Поэтому все математические зависимости и методы расчета допусков на надежность отличны от принятых в теории допусков на точность.

Функциональным назначением любой автоматической линии является выпуск годной продукции и экономическая эффективность по сравнению с неавтоматизированным производством. Следовательно, требования к надежности должны назначаться, исходя из обеспечения линией требуемых технико-экономических показателей: заданной производственной программы, допустимых сроков окупаемости, нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, положительного годового экономического эффекта и т.д. Если, например, для обеспечения эффективности капиталовложений не менее $E = 12\%$ в год линия должна работать с коэффициентом технического использования не ниже $\eta_{\text{экт}} = 0,77$, то величина $0,77 < \eta_{\text{эл}} < 1,0$ и есть допуск на надежность линии

¹⁾ ГОСТ 7713-62. Допуски и посадки. Основные определения, 1966 г.

Требования к надежности встроенных станков, механизмов и устройств линии должны устанавливаться таким образом, чтобы их выполнение обеспечивало заданный уровень надежности линии в целом.

Допустимые отклонения по своей природе являются "односторонними", - в качестве одной из предельных величин принимается идеальное значение данного показателя (в данном случае $\gamma_{ал\ min} = 1,0$). Расчеты сводятся к определению второго, "худшего" предельного значения, при котором система или элемент "на пределе" обеспечивают заданное функциональное назначение. Такие значения, например, $\gamma_{ал\ min}$, в дальнейшем будем называть допустимыми показателями надежности.

В соответствии с поставленной задачей работа включает следующие этапы:

1) количественный анализ ^{взаимосвязи} эксплуатационной надежности с производительностью и экономической эффективностью автоматических линий (глава II);

2) разработка на основе полученных зависимостей расчетных формул для определения допустимых показателей надежности линий, станков и механизмов; анализ зависимости требований к надежности от конструктивных, технологических и т.д. параметров линий и тенденций их развития (глава III);

3) разработка методов анализа производительности и надежности действующих автоматических линий и расчетов фактических показателей надежности; определение круга задач, решаемых путем сравнения фактических показателей надежности с допустимыми (глава IV);

4) анализ структуры автоматических линий и определение оптимальных структурных параметров как исходных данных для расчета требований к надежности (глава V);

5) анализ работоспособности некоторых типов автоматических линий, определение допусков на их надежность, сравнение требуемого и фактического уровня надежности; предложения по повышению производительности, надежности, экономической эффективности автоматических линий (глава VI).

II. Взаимосвязь надежности с технико-экономическими показателями автоматических линий

Экономическая эффективность автоматических линий обеспечивается обычно за счет 1) повышения производительности и 2) сокращения количества обслуживающих рабочих по сравнению с неавтоматизированным производством. В работе показано, что эти показатели в сильнейшей степени зависят от уровня эксплуатационной надежности линии — чем ниже показатели надежности, тем выше простои и трудоемкость обслуживания линий, а следовательно, ниже производительность и больше необходимое количество наладчиков.

Получены обобщенные формулы производительности, которые охватывают любые варианты построения системы машин: от поточной линии до автоматической линии с жесткой связью, с учетом надежности встроенного оборудования и длительности рабочего цикла. Чем выше интенсивность отказов оборудования автоматических линий, тем ниже их производительность, особенно при высокой концентрации операций технологического процесса, что характерно для автоматических линий. Деление линий на участки с установкой межоперационных накопителей позволяет повысить производительность линий при том же уровне надежности конструктивных элементов. Выигрыш в производительности тем больше, чем ниже надежность у встроенного оборудования, однако, непропорционален количеству участков, на которое расчленена линия. Формулы выведены с учетом принятого в теории производительности условия, будто линии делятся на участки по методу равных потерь, что является идеальным случаем. Однако исследования показали, что даже при делении реальных линий на участки с равным количеством станков отклонение от принципа равных потерь не выше, чем в 1,6 — 1,7 раза, а реально — не более, чем на 20 — 40%. При этих условиях, как показало математическое моделирование, погрешность расчетов производительности при использовании допущения о делении линии по методу равных потерь не свыше 5 — 6%.

Зависимость количества наладчиков при обслуживании автоматических линий от их надежности в работе решалась по критерию минимума эксплуатационных затрат. Показано, что наиболее выгодное количество станков или участков в линии, обслуживаемых одним наладчиком, зависит прежде всего от надежности станков в работе, их стоимости, протяженности зоны обслуживания и т.д. Получены расчетные зависимости, доведенные до инженерного уровня. Так, для автоматических линий подшипниковой промышленности, если коэффициент технического использования одного автомата, встроенного в линию $\eta_{uc} = 0,75 - 0,80$, один наладчик должен обслуживать четыре таких автомата; при $\eta_{uc} = 0,65 - 0,70$ — только два автомата; если $\eta_{uc} < 0,65$, каждый автомат обслуживается специальным наладчиком. В линиях из агрегатных станков уровень надежности станков участка того же порядка, что и одного автомата в линиях с гибкой связью, но значительно выше стоимость, протяженность участка и длительность подготовительно-заключительного времени (простоев для предупреждения отказов). Поэтому лишь при коэффициенте технического использования одного участка 0,90 и выше, один наладчик может обслуживать два участка; если $\eta_{uc} = 0,75 - 0,80$ наладчик обслуживает участок, при $\eta_{uc} < 0,7$ целесообразно иметь по два наладчика на каждом участке и т.д.

В итоге на базе теории производительности машин и труда определена следующая взаимосвязь показателей надежности с технико-экономическими показателями автоматических линий.

1. Показатели надежности i -го механизма или устройства:

а) интенсивность отказов ω_i ; б) среднее время обнаружения и устранения отказов $\theta_{срi}$; в) внецикловые потери из-за отказов данных механизмов и устройств (в станке " ρ_i " механизмов, каждый из которых срабатывает " S_i " раз за рабочий цикл)

$$B_i = \rho_i \cdot S_i \cdot \omega_i \cdot \theta_{срi} \quad (I)$$

2. Показатели надежности станка, встроенного в авто-

а) суммарные внецикловые потери из-за отказов всех механизмов, устройств, инструментов

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + \dots = \sum B_i \quad (2)$$

б) коэффициент технического использования станка

$$b_{uc} = \frac{1}{1+B} \quad (3)$$

3. Характеристики автоматической линии из q - станков, разделенной на n_y участков:

а) коэффициент технического использования

$$\begin{aligned} b_{ал} &= \frac{1}{1 + \frac{\sum t_n}{T} \cdot \frac{q}{n_y} w} = \frac{1}{1 + B \cdot \frac{q}{n_y} w} = \\ &= \frac{1}{1 + B \frac{q}{n_y} [n_y - \gamma(n_y - 1)(1 - \Delta)]} \end{aligned} \quad (4)$$

где " $\sum t_n$ " и " B " - внецикловые потери одного станка, встроенного в линию (технические простои, приходящиеся соответственно на единицу изделия и на единицу времени безотказной работы);

T - длительность рабочего цикла;

w - коэффициент возрастания внецикловых потерь из-за неполной их компенсации накопителями;

γ - доля случайных, компенсируемых потерь в общих собственных потерях линии;

Δ - коэффициент межучасткового наложения случайных потерь.

В частном случае, когда все потери можно считать компенсируемыми ($\gamma = 1$)

$$b_{ал} = \frac{1}{1 + B \frac{q}{n_y} [1 + \Delta(n_y - 1)]} \quad (5)$$

б) производительность автоматической линии

$$Q = \frac{P}{T} \cdot \eta_{ал} = \frac{P}{T} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum t_n}{T}} \cdot \frac{1}{\eta_{пy} [n_y - \gamma(n_y - 1)(1 - \Delta)]} \quad (6)$$

где P — число параллельных потоков обработки;
 T — длительность рабочего цикла.

4. Сравнительные технико-экономические показатели автоматической линии и неавтоматизированного производства;

а) рост производительности автоматической линии по сравнению с поточной

$$\varphi = \varphi_{ном} \frac{\eta_{ал}}{\eta_{ном}} \quad (7)$$

где $\varphi_{ном}$ — проектный номинальный рост производительности при номинальном коэффициенте использования линии $\eta_{ном}$;

$\eta_{ал}$ — коэффициент технического использования линии, как комплексный показатель ее надежности;

б) сокращение количества обслуживающих рабочих по сравнению с поточной линией

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{ном}}{\varepsilon(\eta_{ис})} \quad (8)$$

где $\varepsilon_{ном}$ — номинальное (по проекту) сокращение количества обслуживающих рабочих при проектных нормах обслуживания наладчиков;

$\varepsilon(\eta_{ис})$ — коэффициент изменения экономии затрат ручного труда при автоматизации как функция уровня надежности станков, встроенных в линию $\eta_{ис}$;

в) рост производительности общественного труда при внедрении автоматической линии

$$\lambda = \varphi_{ном} \frac{\eta_{ал}}{\eta_{ном}} \cdot \frac{K + N(m_1 + m_2 + 1)}{K\delta + N[m_1\delta + m_2\delta\varphi_{ном} \frac{\eta_{ал}}{\eta_{ном}} + \frac{\varepsilon(\eta_{ис})}{\varepsilon_{ном}}]} \quad (9)$$

где m_1, m_2 — отношение годовых затрат на ремонт и обслуживание и годовых затрат на инструмент и электроэнергию при неавтоматизированном производстве

к годовому фонду зарплаты, обслуживающих рабочих

K - отношение стоимости оборудования неавтоматизированного производства к годовому фонду зарплаты обслуживающих рабочих;

σ - коэффициент увеличения стоимости автоматической линии по сравнению с неавтоматизированным производством;

δ - коэффициент изменения затрат на инструмент и электроэнергию, приходящихся на единицу изделия;

г) годовой экономический эффект внедрения линии (в масштабах годового фонда зарплаты обслуживающих рабочих)

$$J = K(E_n + \alpha_1 + \alpha_2) \left(\varphi_{\text{ном}} \frac{p_{ал}}{p_{\text{ном}}} - \sigma \right) + \varphi_{\text{ном}} \frac{p_{ал}}{p_{\text{ном}}} [m_2(1-\delta)+1] - \frac{\varepsilon(p_{ис})}{\varepsilon_{\text{ном}}} \quad (10)$$

где E_n - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

α_1 - нормативный коэффициент амортизации;

α_2 - коэффициент текущих затрат, отношение годовых затрат на текущий ремонт и обслуживание к стоимости оборудования;

δ - коэффициент эффективности капиталовложений на создание линии

$$E = \frac{K(\sigma - \varphi_{\text{ном}} \frac{p_{ал}}{p_{\text{ном}}})}{K(\alpha_1 + \alpha_2) \left(\varphi_{\text{ном}} \frac{p_{ал}}{p_{\text{ном}}} - \sigma \right) + \varphi_{\text{ном}} \frac{p_{ал}}{p_{\text{ном}}} [m_2(1-\delta)+1] - \frac{\varepsilon(p_{ис})}{\varepsilon_{\text{ном}}}} \quad (11)$$

Здесь известные критерии экономической эффективности выражены через сравнительные показатели обоих вариантов: рост производительности (φ), сокращение количества обслуживающих рабочих (ε), увеличение стоимости (σ), изменение удельных затрат на инструмент и электроэнергию (δ), с учетом уровня надежности автоматической линии.

Формулы (I) - (II) оправданы для любых типов автоматических линий и позволяют, исходя из показателей надежности отдельных механизмов и устройств ($\omega, \theta_{ср}, B_i$)

перейти к показателям надежности станков (B, η_{uc}) и линий в целом ($\eta_{ал}$) и далее к технико-экономическим показателям автоматических линий ($A, \mathcal{E}, E$) в зависимости от уровня их надежности ($\eta_{ал}$).

III. Допустимые показатели надежности

Для того, чтобы получить формулы для расчета требований к надежности, нужно систему уравнений (I) - (II) решить в обратном порядке; именно: задаваясь требуемой величиной технико-экономических показателей в формулах (6), (9) - (II), определить, каков должен быть уровень надежности автоматических линий ($\eta_{ал}$) и их составляющих (η_{uc}, t_n) для обеспечения этих показателей.

При расчете требований к надежности автоматических линий в целом (величины $\eta_{ал min}$) возможны три основных варианта.

1. Линия предназначена для обработки, контроля, сборки изделий на предприятиях, где технологические потоки практически независимы. Требования к надежности определяются заданной экономической эффективностью; для их расчета нужно воспользоваться формулами (9) - (II), решив из относительно $\eta_{ал}$. Так как показатель надежности линии $\eta_{ал}$ входит в формулы (9) - (II) и др., дважды (при показателях роста производительности " Ψ " и сокращения количества рабочих " $\mathcal{E}$ "), то для определения величины $\eta_{ал min}$ по заданной величине $\mathcal{E}, E$ и т.д., удобнее пользоваться графоаналитическими методами. Приведены примеры расчетов для конкретных типов автоматических линий.

2. Линия предназначена для обработки, контроля одной из деталей или сборки одного из узлов сложного изделия (автомобиля, трактора и т.д.), где выпуск отдельных деталей не может варьироваться в широких пределах. Требования к надежности линии ($\eta_{ал min}$) должны рассчитываться не только из экономических критериев, но и обеспечения требуемой программы выпуска по формуле

$$\eta_{ал min} = \frac{P_r \cdot T}{60 \cdot p \cdot F_d \cdot \eta_3} \quad (I2)$$

где Π_r - заданная программа выпуска изделий в год;
 T - длительность рабочего цикла линии или ее выпускного участка, в мин;
 μ - количество изделий, выдаваемых за один рабочий цикл;
 F_d - годовой плановый фонд времени рабочей линии с учетом сменности работы и длительности планово-предупредительных ремонтов;
 η - ожидаемый коэффициент загрузки линии, учитывающий организационно-технические потери в сложном взаимосвязанном производстве.

3. Целью расчета является определение типовых требований к надежности массовых узлов, из которых komponуются линии различного назначения. Оптимизированное значение $\eta_{алонт}$ должно быть определено по типовым структурным и стоимостным показателям линий данного типа, методика изложена в главе V.

Зная требования к надежности линий в целом, можно рассчитать требования к надежности встроенных станков и механизмов, исходя из обеспечения требуемой величины $\eta_{алмин}$.

Максимально допустимые простои одного станка, встроенного в линию (на единицу изделия) рассчитываются по формуле

$$\Sigma t_{n_{max}} = \frac{T(1 - \eta_{алмин})}{\eta_{алмин} \cdot w} \cdot \frac{n_y}{q} \quad (13)$$

где T - длительность рабочего цикла;
 q - количество последовательных станков в линии;
 n_y - количество участков, на которые разделена линия;
 w - коэффициент возрастания внецикловых потерь из-за неполной их компенсации накопителями.

Так, если линия из $q = 30$ станков, разделенная на три участка, с циклом 1,5 минуты, должна работать с коэффициентом технического использования не ниже, чем $\eta_{алмин} = 0,8$, простои одного станка в линии, отнесенные на единицу продукции, не должны превышать $\Sigma t_{n_{max}} = 0,03$ мин.

Минимально допустимый коэффициент использования одного станка, встроенного в линию

$$h_{ucmin} = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \eta_{anmin}) n_y}{\eta_{anmin} \cdot q \cdot w}} \quad (14)$$

В линиях с ветвящимися потоками, где длительность рабочего цикла отдельных станков резко отличается, рассчитанная величина η_{anmin} означает требования к коэффициенту использования лимитирующих станков с учетом собственных и дополнительных потерь (из-за неполной компенсации накопителями простоев других станков). Величина h_{ucmin} для тех же станков означает требования к надежности самих станков на лимитирующих операциях.

Минимально допустимое количество рабочих циклов между двумя отказами (наработка на отказ) станка, встроенного в линию

$$k_{nmin} = \frac{\theta_{cp} \cdot \eta_{anmin}}{T(1 - \eta_{anmin})} \cdot \frac{q}{n_y} w \quad (15)$$

где θ_{cp} — среднее время обнаружения и устранения отказов.

При расчете требований к надежности механизмов и устройств, необходимо задаться дополнительным условием — допустимой долей потерь данного вида " α_i " в общих допустимых потерях станка, т.е. распределить суммарный допуск на надежность станка между его конструктивными элементами.

Многочисленные исследования в условиях эксплуатации показали, что однотипные автоматические линии являются подобными системами, т.е. подобие технологического назначения, номенклатуры конструктивных элементов и принципа их действия предопределяет и подобие эксплуатационных параметров. Так, в линиях токарной обработки подшипниковых колец у всех исследованных многошпиндельных автоматов около половины составили простои по инструменту ($\alpha_i = 0,5$); среди механизмов наибольшие простои возникают из-за отказов автооператоров ($\alpha_i = 0,25 + 0,35$), на третьем месте по удельному весу — простои для предупреждения отказов ($\alpha_i = 0,10 - 0,14$), почти независимо от количества позиций, режимов обработки и т.д. Таким образом, путем исследования работы действующих автоматических линий и обобщения результатов методами теории

подобия можно прогнозировать удельный вес потерь и в проектируемых системах, а при расчете требований к надежности - задаваться достоверными значениями α_i .

Минимальное допустимое среднее количество рабочих циклов механизма между двумя отказами (допустимая средняя наработка на отказ) рассчитывается по формуле

$$k_{nmin} = \frac{n_i \cdot S_i \cdot \bar{\theta}_{cp}}{\alpha_i} \cdot \frac{\eta_{anmin}}{T(1 - \eta_{anmin})} \cdot \frac{q}{n_y} \cdot w \quad (16)$$

где n_i - количество данных механизмов в станке;
 S_i - количество срабатываний за один рабочий цикл станка;
 $\bar{\theta}_{cp}$ - среднее время единичного простоя станка для обнаружения и устранения отказов данного механизма;
 α_i - допустимая доля потерь по вине данного механизма в общих собственных потерях станка.

Расчеты по формулы (16) показали, что при малой длительности рабочего цикла (T), например, в роторных линиях, допустимая наработка на отказ исчисляется тысячами и десятками тысяч срабатываний. Так, в линии из семи роторов с числом инструментальных блоков в каждом роторе 6, при длительности рабочего цикла (один оборот ротора) $T = 0,6$ сек и других типовых конструктивных и структурных показателях; если необходимо, чтобы линия имела коэффициент технического использования $\eta_{anmin} = 0,85$ и потери по инструменту составляли не более половины ($\alpha_i = 0,5$), средняя стойкость каждого инструментального блока должна быть не менее 90.000 - 100.000 изделий. Невозможность выполнения таких требований заставляет в ряде случаев либо занижать режимы обработки, либо переходить к конструкции с автоматической сменой инструмента.

Расчет допусков на надежность автоматических линий, встроенных станков, механизмов и устройств по формулам (9) - (16) требует знания в качестве исходных данных ряда стоимостных, технологических, структурных, конструктивных и т.д. показателей линий и их элементов. Для практического выполнения расчетов проработана методика получения исходных данных,

что позволяет рассчитать допуски на надежность любых типов линий; большое количество исходных данных для разных линий сведено в таблицы.

Как видно из формулы (16), требования к надежности механизмов зависят от их количества, длительности рабочих и холостых ходов, количества заблокированных станков в линии и т.д. Эти факторы не остаются неизменными во времени, потому что тенденциями автоматизации являются интенсификация технологических процессов, увеличение быстродействия механизмов, конструктивное и структурное развитие автоматических линий. Отсюда непрерывно растут $k_{мин}$ при сохранении уровня требований к системе в целом.

В результате те или иные конструктивные и компоновочные решения, ранее оправдывавшие себя, уже не соответствуют новым требованиям к надежности, и это приводит к революционному преобразованию конструкции и компоновки машин, даже при полном сохранении функционального назначения. Это иллюстрировано на примере токарных многошпиндельных автоматов обработки подшипниковых колец, где внедрение прогрессивных заготовок привело к резкой интенсификации работы машин. Так, в АЦ-2 завода ИПЗ при обработке колец подшипников 804704 на автоматах КА-76 интервал выдачи колец составляет 2 сек вместо 40 сек на автоматах I26I, работающих по старому техпроцессу в неавтоматизированном производстве. Оба автомата имеют идентичный комплект инструментов и механизмов (шпиндели, суппорты, механизмы зажима, поворота, фиксации, распредел и т.д.), однако, требования к надежности их в обоих станках резко различны. Согласно исследованиям, автооператоры к станкам I26I в линии Князькова Н.М. имеют отказы в среднем через 20 - 25 рабочих циклов, что при малой интенсивности работы почти удовлетворительно. Однако, если бы автооператоры с таким уровнем надежности были применены в автоматах КА-76, где длительность цикла - 4 сек, то согласно расчетам автомат только по вине автооператоров имел бы до 90 остановок в час (!), т.е. ни о какой работоспособности не могло быть и речи. Очевидно, прогрессивная технология, связанная с интенсификацией работы машин, привела к резкому росту требований к надежности автооператоров при полном сох-

ранении их функционального назначения (съём и установка колец).

Действительно, согласно расчетам, автооператоры в линии системы Н.М.Князькова должны иметь среднюю наработку на отказ около $k_{мин} = 55$ рабочих циклов, при автоматизации проточной линии карданных подшипников по старому техпроцессу $k_{мин} = 30 - 35$ рабочих циклов. В автоматической линии карданных подшипников при тех же исходных условиях ($\beta_{элем} = 0,8$; $\alpha_i = 0,3$) допустимы отказы не чаще, чем через $k_{мин} = 890 - 900$ рабочих циклов, т.е. требования к надежности выше почти в 20 раз!

Известные конструкции автооператоров к токарным многошпиндельным автоматам, исследованные в настоящей работе, имеют фактическую наработку на отказ в диапазоне $k_n = 20 - 120$ рабочих циклов, следовательно, ни одна из них в автоматах КА-76 уже не могла быть применена из-за недостаточного уровня надежности, что можно иллюстрировать и на примерах других механизмов.

За 10 месяцев опытной эксплуатации направляющие поперечных суппортов автомата КА-76 износились до 30 мм, базовые грани корпуса клина представляли сплошные рифленые поверхности, так как за эти месяцы автомат сделал столько рабочих циклов, сколько автоматы по обычным технологическим процессам выполняли за 12-14 лет. И в этом случае конструкции суппортов с призматическими направляющими, методы их защиты от стружки, материалы трущихся поверхностей и так далее, оказываются неудовлетворительными по долговечности и надежности, хотя функции суппортов остались неизменными.

В работе показано, что интенсификация работы машин благодаря прогрессивной технологии обработки колец должна привести в токарных автоматах к революционным преобразованиям не только механизмов (автооператоры, суппорты, зажимные механизмы), но и кинематики (равномерное вращение распредвала), компоновки и т.д.

Таким образом, теория требуемой надежности позволяет прежде всего производить научный количественный анализ тенденций развития конструкций машин, прогнозировать это развитие, выявлять его закономерности. Данная закономерность

которая, очевидно, справедлива для любых машин, сформулирована следующим образом: технический прогресс связан с постоянным совершенствованием технологии и ростом производительности машин, что приводит к интенсификации их работы. Это вызывает резкий рост требований к надежности всех механизмов рабочих, холостых ходов и управления и в итоге — к сменяемости их конструкций, конструктивному совершенствованию машин. Таким образом, любая революция в технологии неизбежно приводит к революции в конструкциях машин, и в этом заключается диалектика их развития.

IV. Методы анализа производительности и надежности действующих автоматических линий и расчета фактических показателей надежности

Анализ эксплуатационной надежности автоматических линий, выявление путей и перспектив ее повышения может производиться только на основе сравнения допустимых показателей надежности с фактическими, которые рассчитываются путем исследования работоспособности линий в условиях эксплуатации. Эти исследования позволяют определить и некоторые исходные данные для расчета требований к надежности отдельных станков, механизмов и устройств (см. гл. III).

Предложенные методы анализа работоспособности действующих автоматических линий отличаются от других известных методик комплексностью рассмотрения вопросов производительности и надежности, а также инженерной наглядностью. Количественный анализ производительности рекомендуется производить в следующей последовательности:

а) фактические наблюдения (фотография работы, хронометраж простоев) и замеры (длительность рабочего цикла и его элементов, режимы обработки, точность заготовок и изделий) и т.д.;

б) первичная обработка полученной информации, расчет фактической циклограммы и построение баланса фонда времени, который показывает в процентах, какую часть планового фонда времени линия работала и простаивала по различным причинам технического и организационного характера;

в) расчет эксплуатационных характеристик линии и ее элементов: коэффициента использования, коэффициента готовности; фактической производительности, внецикловых потерь, среднего коэффициента использования одного станка в линии; коэффициента возрастания внецикловых потерь станков и участков из-за неполной их компенсации накопителями, удельного веса различных категорий собственных потерь и т.д.;

г) определение достоверности полученных данных, которая зависит от типичности выбранного периода наблюдения, достаточности их объема и точности проведения наблюдений; предложена проверка достоверности методом "нарастающего итога", которая дополняет известные классические методы, наглядно показывает тенденции изменения искомой случайной величины, знак ошибки ее численного значения;

д) построение баланса производительности, который количественно характеризует все факторы, влияющие на производительность, в том числе, надежность механизмов и инструмента, стабильность протекания техпроцесса, прогрессивность технологии, конструктивное совершенство машины и т.д.;

е) расчет резервов повышения производительности при внедрении конкретных организационно-технических мероприятий, направленных на совершенствование технологии и конструкции, улучшение загрузки линии, повышение надежности в работе и т.д.

Методика иллюстрирована результатами исследований конкретных автоматических линий на передовых машиностроительных заводах. Она включает, как составную часть, расчет некоторых показателей надежности $\eta_{ал}$, $\eta_{ис}$, Σt_n , B и резервов повышения производительности при их улучшении. Расчет и анализ других показателей надежности можно производить на основе тех же наблюдений и замеров, как и анализ производительности, в следующей последовательности;

а) систематизация данных фотографий работы участка линии, станка или механизма по интервалам безотказной работы, группирование результатов в соответствии с методами математической статистики;

б) расчет среднего количества рабочих циклов между двумя отказами (средней наработки на отказ);

в) построение статистической и вероятностной функций надежности, изображение их на одном графике;

г) проверка достоверности полученных численных значений как известными в математике методами, так и предложенным методом "нарастающего итога";

д) расчет средней длительности единичных простоев для обнаружения и устранения отказов по тем же результатам хронометража;

е) расчет величины внецикловых потерь как комплексного показателя надежности, учитывающего и безотказность, и ремонтпригодность системы и ее элементов;

ж) расчет и построение диаграмм надежности, которые наглядно отражают оба показателя надежности: интенсивность отказов и длительность их устранения.

Методика иллюстрирована на примерах конкретных автоматических линий, анализ сравнительной надежности механизмов одинакового целевого назначения сделан для типовых механизмов линий из агрегатных станков: шаговых транспортеров, механизмов зажима и фиксации, поворотных столов, а также транспортирующих систем линий токарной обработки ступенчатых валов.

Сравнение допустимых показателей надежности (из заданных технико-экономических показателей) с фактическими позволит решать ряд задач проектирования и эксплуатации автоматических линий, в том числе:

1) сдача - приемка автоматических линий по нормам надежности наряду с нормами точности, жесткости и т.д.; в работе сделан анализ существующих методов сдачи - приемки линий по показателям производительности и надежности и даны предложения по их совершенствованию, рассчитаны примерные нормы надежности для типовых механизмов линий из агрегатных станков (силовых головок, транспортеров, приспособлений, поворотных столов и оборудования облокированных участков);

2) определение пригодности станков для встраивания в автоматические линии. Так, в подшипниковой промышленности линии токарной обработки часто создаются на базе соответствующих поточных линий из многшпиндельных полуавтоматов путем оснащения их механизмами автоматической загрузки - выгрузки (автооператорами), транспортерами - распределителя-

ми, накопителями колец и т.д. Расчеты для условий ИПЗ показали, что эффективность таких линий будет только при условии, если автоматизация станков не приведет к снижению их производительности ($\eta_{ал} \approx \eta_{ном}$). Между тем, согласно исследованиям работоспособности, производительность станков типа I26I в результате автоматизации снизилась до 20% ввиду неполного замещения функций человека, механизмами и роста интенсивности отказов не только по оборудованию, но и по инструменту ($\eta_{ном} = 0,89$; $\eta_{ал} = 0,71$). Следовательно, станки для встраивания в линию были непригодны, что можно было установить путем исследования работоспособности одного образца автоматизированного станка по методике, описанной выше. Этого не было сделано, в результате после нескольких лет эксплуатации линию из 40 станков пришлось демонтировать.

3. Выбор наиболее перспективных конструкций и принципиальных схем механизмов при наличии нескольких вариантов. В настоящее время существует большое количество различных конструкций типовых механизмов одинакового назначения (автооператоры, силовые головки, шаговые транспортеры, поворотные столы и т.д.). Одним из важнейших критериев выбора является надежность в работе. Разработанные методы анализа сравнительной надежности позволяют выбрать наиболее надежные конструкции; сравнение фактических показателей с требуемыми позволяет определить их пригодность и перспективность, что иллюстрировано в работе на примере типовых механизмов линий из агрегатных станков.

4. Оценка результатов производственных и стендовых испытаний на надежность станков, механизмов и устройств при их разработке, макетировании, доводке и т.д. В настоящее время такая оценка производится лишь качественно, потому что не известно, до какого уровня необходимо доводить данные объекты, достаточен ли зафиксированный при испытаниях уровень показателей надежности.

В перспективе теория надежности позволяет рассчитывать количественные требования к конструктивным и технологическим параметрам проектируемых машин и их механизмов (допустимые величины неустойчивости перемещений, разброса тем-

пературы, колебания размеров заготовок и собираемых изделий, точности сборки и т.д.), т.е. решать вопросы расчета и конструирования машин и механизмов не только с точки зрения кинематики и прочности, но и эксплуатационной надежности.

У. Анализ структуры автоматических линий и определение оптимальных структурных параметров

Для расчета требований к надежности встроенных станков, механизмов и устройств по формулам (13)– (16) и др., необходимо знать в качестве исходных данных структурные параметры линии: количество станков (q) и участков, на которые разделены линия $1 \leq n_y \leq q$, тип накопителей, степень возрастания простоев из-за неполной компенсации W и т.д.

Простейшим структурным вариантом автоматической системы машин является линия с жесткой связью, которая имеет минимальную надежность, потому что отказ любого элемента приводит к отказу и простоя всей системы. Для повышения производительности и надежности линий широко используется их структурное усложнение: деление на участки с установкой междооперационных накопителей, применении параллельных участков, станков – дублеров и т.д. Два основных варианта расчленения систем: а) линия из станков, разделенная на n_y участков – секций; если число участков равно числу станков $n_y = q$, такая система называется линией с гибкой связью;

б) несколько независимых автоматических линий с жесткой связью, между которыми располагаются механизированные накопители с ручным обслуживанием; при $n_y = q$ такая система представляет собой поточную линию. В результате, например, система из $q = 12$ станков может быть скомпонована по II структурным вариантам.

Анализ формул показывает, что рост производительности машин при делении системы на участки или самостоятельные линии зависит от протяженности линии, надежности встроенного оборудования, удельного веса случайных потерь, которые могут компенсироваться накопителями, степени их компенсации и т.д. Согласно расчетам, в линии из 30 станков, каждый из которых имеет внецикловые потери $B = 0,03$, если 70% простоев яв-

ляются случайными и могут на 90% компенсироваться накопителями, деление системы на $n_y = 2$ участка позволяет получить $\Delta \varphi_2 = 16\%$ прироста производительности. Если вместо двухучастковой схемы выбрана трехучастковая, прирост производительности будет еще $\Delta \varphi_3 = 8\%$; при четырехучастковой схеме - $\Delta \varphi_4 = 3\%$ и т.д. Деление даже развитых линий ($q = 50 - 60$ позиций) с $B = 0,02 - 0,03$ (показатели линий из агрегатных станков) на число участков более четырех нецелесообразно, потому что прирост выпуска продукции менее 3-4% можно получить и более простыми путями, без капитальных затрат (улучшение системы обслуживания, интенсификация режимов обработки и т.д.). Высокая степень расчленения автоматических линий зачастую невыгодна и экономически, так как дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты растут пропорционально числу участков. Поэтому для любых видов автоматических линий, в соответствии с типовыми стоимостными, конструктивными и эксплуатационными характеристиками существует и оптимальная степень их расчленения на участки или самостоятельные линии.

Оптимизация структурных параметров автоматических линий производилась по критериям роста производительности общественного труда, эффективности капиталовложений, приведенных затрат. Получены формулы для определения: а) максимальной длины безбункерных линий (линий с жесткой связью); б) типа расчленения автоматических линий (на участки или самостоятельные линии); в) оптимальной степени расчленения. Показано, что оптимальное количество участков или самостоятельных линий зависит от протяженности системы, ее стоимости и ремонтосложности, надежности встроенного оборудования, емкости накопителей и их стоимости и т.д. Обосновано применение приближенных расчетных формул, потому что большинство определяющих параметров при проектировании точно не известно и меняется по величине в процессе эксплуатации; кроме того, окончательный результат должен обязательно округляться до целого значения (до 30-40%). Это подтверждено математическим моделированием работы автоматических линий, которое показало, что при принятой величине емкости накопителей пренебрежение межучастковым наложением потерь

приводит к погрешностям в оценке производительности менее 5%. Ни один другой параметр линии, даже ожидаемые сроки службы, не может быть известен с такой точностью.

Выполненные расчеты показали, что для многих типов линий оптимальными являются "предельные" структурные характеристики ($n_y = I$ или $n_y = q$). Так, линии подшипниковой промышленности сейчас и в перспективе будут компоноваться только с гибкой связью ($n_y = q$), линии обработки изделий типа валов с $q = 6 \div 7$ целесообразно компоновать с жесткой связью ($n_y = I$). Линии из агрегатных станков с числом позиций до II - I3 следует строить с жесткой связью; линии с числом позиций до I8 - 20 делить на два участка; линии с q до 25 - на три участка и т.д. Полученные результаты сведены в таблицу, которая содержит рекомендуемые структурные параметры как исходные данные для расчета требований к надежности.

VI. Исследование работоспособности автоматических линий и расчет требований к их надежности

По методике, изложенной в гл. IV, были исследованы 22 автоматические линии отечественного и зарубежного производства трех типов, наиболее распространенных в машиностроении: 1) линии из агрегатных станков; 2) линии токарной обработки колец подшипников; 3) линии обработки ступенчатых валов; некоторые линии исследованы дважды и трижды. По всем линиям рассчитаны технические и эксплуатационные характеристики, в том числе фактические показатели надежности встроенных станков, механизмов и устройств; получены исходные данные для расчета требований к надежности, выполнены расчеты требований к надежности типовых механизмов и устройств, дан их конструктивный анализ; на основе сравнения фактических показателей надежности с допустимыми проанализированы пути повышения надежности в работе.

Ниже кратко излагаются результаты исследований линий из агрегатных станков. Эти линии komponуются из типовых и нормализованных элементов (силовые головки, транспортеры, приспособления, поворотные столы), для которых расчет допусков на надежность особо актуален. Целью их исследований

явилось не только получение исходных данных для расчета требований к надежности, выполнение таких расчетов и сравнение допустимых показателей надежности с фактическими, но и исследование ряда задач, представляющих самостоятельный научный и практически интерес: а) сравнение по уровню надежности линий отечественного и зарубежного (Франция, ФРГ) производства; б) выявление закономерностей изменения показателей надежности во времени эксплуатации; в) анализ некоторых путей повышения надежности и эффективности и т.д.

Были всесторонне исследованы восемь однотипных автоматических линий, из них две - зарубежного производства. Некоторые линии исследованы дважды и трижды. Отдельные исследования проведены еще на семи линиях (в том числе, трех зарубежных); работоспособность основных узлов - агрегатных силовых головок исследована в лабораторных условиях.

По всем линиям были систематизированы технические характеристики и рассчитаны показатели производительности и надежности. Их анализ показывает, что почти везде наибольший удельный вес в балансе затрат фонда времени составляют организационные простои, главным образом, из-за несоответствия программы выпуска проектной мощности линии. Как правило, даже после 5-6 лет эксплуатации линии работали с недогрузкой 30-35% и более. Средний коэффициент технического использования одного агрегатного станка, встроенного в линию, составляет 0,97, что можно принимать в основу расчетов при проектировании новых линий. Линии зарубежного производства по уровню надежности в целом не превосходят освоенные отечественные линии. Так, в линии картера сцепления ЗИЛ (Фирмы "Рено") среднее время безотказной работы не превышает 6,5 + 7,0 минут, а большинство целевых механизмов работают хуже, чем однотипные механизмы отечественных линий. Трехкратные исследования работоспособности линии картера сцепления в течение шести лет и другие исследования показали, что на изменение уровня надежности влияют факторы, с одной стороны, износа и усталостной прочности, с другой - отладки, освоения линий, повышения квалификации обслуживающего персонала. У механизмов, обеспечивающих точность обработки (силовые головки, механизмы зажима и фиксации) уровень надежно-

сти несколько снижается ввиду износа, ухудшения жесткости и т.д. У механизмов, не связанных непосредственно с точностью обработки (шаговые транспортеры, поворотные столы, прессы, система управления и т.д.), уровень надежности повышается за счет отладки, освоения, повышения квалификации наладчиков. Так как подавляющее большинство отказов (до 70-80%) приходится на механизмы холостых ходов и управления, общей тенденцией является повышение производительности и надежности линии во времени (при соблюдении планово-предупредительных ремонтов). Так, на линии "Блок-2" выпуск за 1957-66 годы вырос более, чем на 20%, на линии картера сцепления суммарные внецикловые потери из-за отказов механизмов составили в 1962 году $B_0 = 0,52$, в 1968 - $B_0 = 0,32$.

Как показали исследования, различные конструкции механизмов одинакового целевого назначения отличаются по уровню надежности зачастую во много раз. Так, в линии картера сцепления средняя наработка шагового транспортера составляет 300 - 320 рабочих циклов, а линии поворотного кулака - почти 4000 циклов, что целиком определяется принятой конструктивной схемой, качеством изготовления и т.д.

Обобщение результатов исследований позволило получить необходимые исходные данные для расчета требований к надежности типовых механизмов, прежде всего величины допустимой доли потерь данного вида α_i и средней длительности устранения отказов θ_i .

Произведенные расчеты показали, что уже в действующих автоматических линиях требования к надежности работы механизмов и устройств весьма высоки. Так, для механизмов зажима и фиксации допустимы отказы не чаще, чем в среднем через 1800 - 2000 циклов. Если учесть неизбежные тенденции развития автоматических линий - конструктивное и структурное усложнение, интенсификация технологии, сокращение холостых ходов и т.д., то для автоматических линий ближайшего будущего необходимо иметь механизмы зажима и фиксации с интенсивностью отказов не более одного отказа за 7000-7500 циклов.

Аналогичные требования сегодняшнего и завтрашнего дня рассчитаны для других механизмов и устройств. Их можно рассматривать как ориентировочные нормы надежности при стандо-

Таблица I.

Наименование механизмов и устройств		Минимально допустимое среднее количество циклов между отка- зами	
		Для линий сегод- няшнего д н я	Для линий зав- трашнего дня
Силовые головки	Механизмы главного движения и подачи	32000 - 35000	130000-150000
	Устройства управ- ления циклом	480 - 500	2000-2500
Шаговые транспор- теры		220 - 250	1000-1200
Механизмы зажима и фиксации		1800 - 2000	7000-7500
Поворотные столы		480 - 500	2000-2500
=====			

Рассчитаны примерные нормы надежности для оборудова-
ния участков автоматических линий, которые можно использо-
вать при сдаче - приеме линий.

Сравнение требуемого уровня надежности типовых меха-
низмов с фактическим уровнем для исследованных линий пока-
зывает, что во многих случаях при существующем уровне экс-
плуатации не удовлетворяются даже требования сегодняшнего
дня и это справедливо не только для отечественных, но и за-
рубежных линий. Отсюда насущная задача создания и отработки
новых конструкций.

Показано и иллюстрировано на конкретных примерах, что
перспективным требованиям к надежности могут удовлетворять
простейшие конструкции с минимумом элементов ненадежности,
скомпонованные вне зоны загрязнения и засорения. Значитель-
ное сокращение длительности обнаружения отказов может быть
достигнуто за счет совершенствования систем сигнализации,
которые должны давать не избыточный объем информации при
нормальной работе линии, как это делается сейчас, а минимум
информации о возникающих отказах.

Требования к надежности автоматических линий во многом зависят от их стоимости. Если стоимость линии намного выше, чем неавтоматизированного оборудования, эти требования могут оказаться технически невыполнимыми, т.е. даже при идеальном уровне надежности ($\eta_{ан} \rightarrow 1$) линия не может быть экономически эффективной, что количественно может быть определено по формулам (9) - (II).

Между тем, как показано в работе, такие тенденции современного производства, как увеличение масштабов выпуска (с переходом от однопоточных к многопоточным линиям) и неравномерность производственной программы в течение срока службы линий объективно приводят к относительному удорожанию автоматических линий. В неавтоматизированном поточном производстве на каждой позиции обработки можно иметь минимальное технологически необходимое число станков, добавление новых станков на лимитирующих операциях при росте производственной программы трудностей не представляет. Автоматические линии такой гибкостью не обладают, поэтому дополнительные затраты на автоматическую линию складываются из стоимости не только транспортеров и иных средств автоматизации, но и дополнительных станков.

Так, для обеспечения выпуска картеров коробки перемены передач (ЗИЛ) согласно проведенным исследованиям, в течение 5-6 лет достаточно было иметь поточную линию из 19 станков (станки -дублиры только на 5 операциях обработки из 14), стоимостью около 248 тыс.рублей, в дальнейшем, по мере роста программы выпуска достаточно было добавить еще 4 станка - дублира стоимостью около 50 тыс. рублей, что и обеспечило заданную проектную мощность.

Автоматические линии строятся сразу по полной структурной схеме с возможностями выпуска продукции, которые могут понадобиться в полной мере только через 8-10 лет. Так, автоматическая линия картера коробки перемены передач имеет 32 станка (первый участок - двухпоточный, второй - трехпоточный). Стоимость автоматической линии в 2,3 раза выше стоимости поточной линии в первый период эксплуатации, из них 60% - стоимость транспортеров, накопителя, устройств управления и т.д., а остальное - стоимость дополнительных стан-

ков, которых не было бы в поточной линии. Если производственная программа за срок службы линии увеличивается в 1,5 – 2 раза, то, как показано расчетами, в первый период эксплуатации происходит не окупаемость дополнительных затрат, а наращивание убытков, даже при высокой надежности линии в работе (в линии 1Л85 в среднем $\eta_{\text{ис}} = 0,97$). Чем больше число потоков автоматической линии и неравномерность производственной программы, тем выше дополнительная стоимость автоматических линий, себестоимость единицы продукции, ниже конкурентоспособность автоматических линий по сравнению с неавтоматизированным производством.

В работе предложен и обоснован технически и экономически принцип создания автоматических линий с переменной структурой. Согласно этому принципу, для первого периода эксплуатации автоматические линии должны строиться по простейшей структурной схеме, с минимальным количеством параллельных технологических потоков и промежуточных накопителей (или даже с жесткой межагрегатной связью). В конструкции и планировке линии должны предусматриваться возможность встраивания дополнительных участков, , накопителей и т.д., в процессе эксплуатации линии, по мере роста производственной программы, что позволяет в любой период иметь в линии количество оборудования, возможно ближе к технологически необходимому.

Так, согласно расчетам, в первый период эксплуатации достаточно было бы иметь автоматическую линию 1Л85 с двумя потоками второго участка и без накопителя, что позволило бы сократить дополнительные капиталовложения на 40%, а себестоимость единицы изделия на 15–17% по сравнению с полным структурным вариантом.

Как только резервы данного варианта были исчерпаны, в линию нужно добавить третий поток; встраивание накопителя, согласно исследованиям, необходимо только при превышении проектной мощности на 15–20%. Создание линии с переменной структурой в данном случае позволило бы получить примерную экономию до 250 тыс.рублей, что обеспечило эффективность капиталовложений на автоматизацию, а также дополнительные преимущества: а) в линию будут встраиваться механизмы более

совершенной конструкции, на основе опыта эксплуатации;
б) предприятие будет непрерывно заинтересовано в изыскании и использовании всех резервов, что отсутствует, если линия недогружена на 30-40% и более; в) в течение ряда лет можно иметь дополнительные резервные площади и т.д.

Анализ показывает, что принцип построения линий с переменной структурой, с регламентированным встраиванием оборудования в действующие линии применим не только к линиям из агрегатных станков, но и к другим типам автоматических линий с ветвящимися потоками обработки. Предпосылками к этому являются: а) корректировка производственной программы в связи с народнохозяйственной необходимостью; б) неточная оценка на проектной стадии уровня надежности отдельных станков, что приводит к появлению непредусмотренных узких мест; в) изменение на отдельных станках режимов обработки по сравнению с проектным, что может резко изменить пропускную способность оборудования на различных стадиях обработки.

Конструкция и планировка всех развитых (многопоточных) автоматических линий должна предусматривать возможность структурного наращивания в процессе эксплуатации, и в этом - один из путей повышения эффективности автоматизации производственных процессов.

В Ы В О Д Ы

Основные результаты настоящей работы, по мнению автора, состоят в следующем:

1. На основании многочисленных исследований работоспособности автоматических линий в условиях эксплуатации и экспериментальных исследований выявлена специфика явлений надежности автоматических линий по сравнению с универсальными станками; показано, что основными причинами отказов является не только изнашивание и усталостные напряжения, но в первую очередь нестабильность внешних условий и параметров работы конструктивных элементов - механизмов и устройств.

2. Получены расчетные зависимости для определения допустимых показателей эксплуатационной надежности: для авто-

матических линий — исходя из заданных технико-экономических показателей; для встроенных станков, механизмов и устройств — исходя из выполнения требований к надежности линии в целом; проработана методика получения необходимых исходных данных и выполнения расчетов, доведенная до конкретных примеров по конкретным видам оборудования.

3. Разработаны простые в использовании и наглядные методы анализа производительности и надежности действующих автоматических линий, расчета фактических показателей эксплуатационной надежности, в том числе оригинальные методы проверки достоверности полученных данных.

4. Определен круг научных и практических задач, решаемых методами теории требуемой надежности на основе сравнения допустимых и фактических показателей эксплуатационной надежности (сдача — приемка линий по нормам надежности, определение пригодности станков для встраивания в автоматические линии, выбор наиболее перспективных конструкций механизмов при наличии нескольких вариантов, оценка результатов испытаний на надежность отдельных узлов и т.д.), проработаны конкретные примеры и предложения.

5. Разработаны методы расчета перспективных требований к надежности на основе анализа технологических, структурных и конструктивных характеристик машин; показана диалектика их развития как следствие прогресса технологии и связанного с ним резкого роста требований к надежности конструктивных элементов, что приводит к сменяемости их конструкций даже при полном сохранении функционального назначения.

6. Разработаны методы анализа и расчета оптимальных структурных параметров автоматических линий, впервые доведенных до уровня конкретных примеров расчета и инженерных обобщений по важнейшим типам автоматических линий.

7. Разработана и доведена до инженерного уровня методика выбора наиболее выгодного количества наладчиков при обслуживании автоматических линий, для двух типов линий сделаны расчеты, результаты которых сведены в таблицы.

8. Проведены исследования работоспособности 22 автоматических линий отечественного и зарубежного производства как

типичных представителей трех типов линий, наиболее распространенных в машиностроении: линий из агрегатных станков, линий для обработки тел вращения типа колец и валов; исследовано влияние встраивания станков в автоматические линии на их производительность и надежность в работе, тенденции изменения уровня надежности во времени, взаимосвязь конструктивного совершенствования автоматических линий и их надежности в работе, дан сравнительный анализ надежности различных вариантов конструкций механизмов одинакового назначения и т.д.; получены необходимые исходные данные для расчета требований к надежности.

9. Для автоматических линий из агрегатных станков и линий токарной обработки колец подшипников рассчитаны требования к эксплуатационной надежности типовых механизмов и узлов, которые могут рассматриваться как ориентировочные нормы надежности для линий сегодняшнего и завтрашнего дня; дано сравнение требуемого уровня надежности с фактическим по исследованным линиям, сформулированы некоторые пути повышения надежности линий данного типа.

10. Предложен и обоснован технически и экономически принцип создания автоматических линий с переменной структурой как метод повышения эффективности автоматизации, особенно в условиях высокой массовости и переменной величины производственной программы выпуска изделий.

По результатам настоящей работы Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности выпущены руководящие технические материалы: "Расчет требований к надежности станков, механизмов и устройств в автоматических линиях", разосланные Главным техническим управлением для использования предприятиями и организациями Министерства.

Материалы и результаты работы по вопросам исследования работоспособности машин и автоматических линий, определению резервов повышения производительности, сдаче-приемке автоматических линий по производительности и надежности, рас-

чету оптимальной структуры технологических систем машин и т.д. используются рядом предприятий, научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро, среди которых; заводы ЗИЛ и ИГПЗ, Научно-исследовательский институт машиноведения (г. Минск), НИИТракторсельхозмаш и др.

---00000---

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

а) Книги, брошюры:

1. Волчкевич Л.И. "Надежность автоматических линий", М. Машиностроение, 1969, 20 п.л.

2. Шаумян Г.А., Кузнецов М.М., Волчкевич Л.И. "Автоматизация производственных процессов", М, Высшая школа, 1967, 30 п.л.

3. Волчкевич Л.И., Усов Б.А. "Автооператоры", М, Машиностроение, 1965, 10 п.л.

4. "Расчет требований к надежности станков, механизмов и устройств в автоматических линиях". Руководящие технические материалы, Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности, НИИМаш, 1970г. 4 п.л.

5. Волчкевич Л.И. "Методы анализа производительности и надежности действующих автоматических линий", М, УМК, МГСНХ, 1965, 6 п.л.

6. Волчкевич Л.И. "Агрегатные станки и автоматические линии из агрегатных станков", М, УМК, МГСНХ, 1965, 3 п.л.

б) С т а т ь и :

7. Волчкевич Л.И. "О применении вероятностных методов в теории автоматических линий", Сборник "Межвузовская научная конференция по автоматизации и механизации в машиностроении", МВТУ, 1962.

8. Волчкевич Л.И. "К вопросу определения производи-

тельности автоматических линий". Известия ВУЗов СССР, "Машиностроение", №3, 1962.

9. Волчкевич Л.И. "Определение резервов и путей повышения производительности действующих автоматических линий в машиностроении". Передовой научно-технический и производственный опыт", вып.3, тема 46, №0-62-84/3, Госинти, 1962.

10. Волчкевич Л.И. "Оптимальная компоновка автоматических линий". Известия ВУЗов СССР, "Машиностроение", №9, 1962.

11. "Волчкевич Л.И. "Расчет количества наладчиков в автоматических линиях". Передовой научно-технический и производственный опыт. № 17-64-336/1. Госинти, 1964.

12. Волчкевич Л.И., Кузнецов Б.Н., Колмаков Г.И. "Некоторые проблемы повышения эксплуатационной надежности автоматических линий из агрегатных станков". Известия ВУЗов СССР, "Машиностроение", №11, 1964.

13. Волчкевич Л.И. "Определение требований к надежности механизмов и станков в автоматических линиях". Вестник машиностроения, №4, 1965.

14. Волчкевич Л.И. "Работоспособность автоматических линий из агрегатных станков на автозаводах ЗИЛ и МЗМА". Сборник "Агрегатирование и стандартизация средств производства в машиностроении и приборостроении", МДНТП, 1965.

15. Волчкевич Л.И. "Выбор экономически оптимальной структуры автоматических линий". Механизация и автоматизация производства, №11, 1965.

16. Волчкевич Л.И. "О повышении надежности автоматических линий из агрегатных станков". Стандартизация, №6, 1965.

17. Волчкевич Л.И., Усов Б.А., Колмаков Г.И. "Влияние прогрессивной технологии на развитие конструктивных форм автоматов, встраиваемых в автоматические линии", Известия ВУЗов СССР, "Машиностроение", №9, 1966.

18. Волчкевич Л.И. "Повышение эффективности многопоточных автоматических линий". Вестник машиностроения, №1, 1967.

19. Волчкевич Л.И. "Методы анализа и оценки надежности автоматических линий". Сборник "Новые высокопроизводительные и точные технологические процессы в приборо- и машиностроении", М, МВТУ, 1967.

20. Шаумян Г.А., Волчкевич Л.И., Усов Б.А., Колмаков Г.И. "Комплексное исследование автоматических линий в условиях эксплуатации". Сборник "Автоматизация и механизация производственных процессов в машиностроении", М, Машиностроение, 1967.

21. Волчкевич Л.И. "Требования к надежности автоматических линий из агрегатных станков". Сборник "Стационарные, роторные и цепные автоматические линии", МДНТП, 1967.

22. Волчкевич Л.И. "Оптимальная надежность и выбор структуры автоматических линий из агрегатных станков". Сборник "Стационарные, роторные и цепные автоматические линии", МДНТП, 1967.

23. Шаумян Г.А., Волчкевич Л.И. "Основные направления и задачи теории надежности рабочих машин как составной части теории производительности". Сборник "Теория производительности как основа проектирования машин-автоматов и автоматических линий", М, МВТУ, 1968.

24. Волчкевич Л.И., Мещеряков Р.К. "Исследование работоспособности автоматических линий из малых агрегатных станков". Известия ВУЗов СССР, Машиностроение, №10, 1968.

25. Волчкевич Л.И. "Применение технической диагностики при обосновании целесообразности автоматизации действующего оборудования". Механизация и автоматизация производства", №11, 1968.

26. Шаумян Г.А., Волчкевич Л.И. "Новые работы МВТУ по развитию теории автоматических линий". Сборник "Современные технические направления в конструировании станков и задачи отечественного станкостроения на 1969-1975 года, НИИМаш, 1968.

27. Волчкевич Л.И., Колмаков Г.И., Усубаматов Р.Н. "Причины отказов механизмов и устройств в автоматических линиях". Сборник "Научные основы технологии и прогрессивные технологические процессы в машино- и приборостроении", Москва, МВТУ, 1970 г.

28. Волчкевич Л.И. "Надежность механизмов и машин в автоматических линиях и требования к надежности". Сборник "Теория машин автоматического действия", М, Наука, 1970.

29. Волчкович Л.И. "Расчет допусков на надежность автоматов, автоматических линий и их элементов". Сборник "Исследования в области автоматизации машиностроения", Ташкент, 1970.

Основные положения диссертации докладывались: на конференциях по основным проблемам развития теории машин и механизмов (1967 и 1971 гг.), на межвузовских конференциях (1962, 1967, 1968, 1970 гг.); на отраслевых конференциях в г.Москве, Минске, Перми, Севастополе, Ташкенте, Павлодаре; в научно-исследовательских организациях, конструкторских бюро и на предприятиях: Научно-исследовательском институте машиноведения (г. Минск), ЗИЛ, ИПЗ, Московском станкостроительном заводе им.С. Орджоникидзе, Московском специальном конструкторском бюро автоматических линий и специальных станков и др.