



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»

Кафедра «Сервис и техническая эксплуатация транспортных средств»

Учебное пособие

«Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

Авторы

А.Е.Аствацатуров, М.А.Басилаиа,
С.И.Попов, В.Ю.Валявин

Ростов-на-Дону, 2013



Аннотация

В данной работе рассмотрены знания необходимые для обеспечения безопасности человека управляющего сложными техническими средствами. При этом система «человек-машина» рассматривается в условно упрощенном виде, допускающем решение важных проектно-конструкторских задач обеспечения безопасности.

В данном учебном пособии излагаются вопросы инженерно-эргономического проектирования.

Автор

А.Е. Аствацатуров, д.ф.н., проф.
М.А. Басилаиа, д.ф.н., доцент
С.И. Попов, к.т.н., доцент
В.Ю. Валявин, к.т.н





Оглавление

1. Инженерно-эргономическое проектирование—принципы и проблемы.	4
2. Особенности взаимодействия человека и машины	11
2.1. Человек как звено системы.....	11
2.2. Сравнение звеньев системы.....	15
«человек – машина».....	15
2.3. Надежность системы «человек – машина».....	18
2.4. Анализ проектируемой системы.	23
2.5. Классификация параметров комплекса. Оборудования рабочего места (КОРМ) и критерии качества.	26
3. Проектирование рабочего места оператора машин.....	30
3.1. Рабочее место оператора.....	30
3.2. Работа оператора в положении «сидя» и «стоя»	34
3.3. Рабочее сиденье оператора.	40
Приложение 1. Алгоритмы оценки годовой экономии за счет эргономического обеспечения СЧМ	48
1. Оценка годовой экономии за счет увеличения продолжительности фазы устойчивой работоспособности операторов СЧМ [19].	48
2. Оценка годовой экономии за счет повышения качества СЧМ.....	56
Приложение 2. Решение задач безопасности жизнедеятельности и улучшения условий труда в машиностроении и других отраслях [19].....	61
1. Постановка задачи.....	61
2. Алгоритмы параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения.	74
3. Методика параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения.	88
Литература.....	96



1. ИНЖЕНЕРНО-ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ – ПРИНЦИПЫ И ПРОБЛЕМЫ.

Под *инженерно-эргономическим проектированием* (ИЭП) понимается комплекс инженерных проектных работ, которые определяются основными характеристиками техники, дополненными показателями эргономики и окружающей среды. Эффективность оценивается здесь не только с технико-экономической но и с социальной точки зрения с учетом мер, направленных на сохранение здоровья и всестороннее развитие человека-оператора.

Для того, чтобы машины, созданные с использованием методов инженерной эргономики, были не только совершенны и экономичны, но и удобны в эксплуатации, гармоничны и привлекательны по внешнему виду, необходимо тесное сотрудничество конструкторов, инженеров-эргономистов и художников-конструкторов. Художник-конструктор помогает конструктору системы создавать машину, сообщать ей определенное содержание, делать ее полезной, удобной, красивой.

Художественное конструирование – особая область творчества со своими профессиональными приемами и методами работы. Эта часть знаний связана с методикой художественного конструирования и, естественно, приобретает с помощью специальной методической литературы [20], а также в процессе разработки техники, в ходе накопления практического опыта.

ИЭП должно проводиться на основе системного подхода, учитывающего весь комплекс инженерных, социальных и эконо-



мических факторов, ведущих к достижению с СЧМ заданной целевой функции. При таком проектировании решаются инженерные задачи в едином функциональном комплексе системы, составляется нормативно-руководящая документация, выбираются методы и правила оценки СЧМ, а также разрабатывается и применяется комплекс устройств и моделей для проверки показателей конструктивной надежности, безопасности и эргономичности по заданным критериям.

При ИЭП следует использовать рекомендации, которые по существу представляют синтез основ конструирования и практики эксплуатации машины с данными психофизиологии и других наук о человеке. Эта работа должна охватывать весь цикл создания и применения машины.

На стадии разработки технических предложений, прежде всего, необходимо определить ожидаемые условия эксплуатации СЧМ с учетом противодействующих факторов, затем дать характеристику энергетических и материальных ресурсов, выделив возможности комплекса оборудования рабочего места по обеспечению безопасных условий и нормальной работоспособности оператора.

При разработке **технического задания** (ТЗ) должен быть выделен раздел «Эргономические требования», в котором необходимо привести перечень эргономических показателей как для внутреннего устройства кабины, так и для всей машины в целом, установить критерии эргономичности, например, обзорности, физической нагрузки, ремонтпригодности, контролеспособности,



средств взаимодействия оператора с машиной, средств информации и т.д.

На стадии **эскизного проектирования** следует разработать примерные компоновки рабочих мест, выбрать органы управления и средства отображения информации, пульта управления и контроля, оценить условия труда оператора, составить антропометрическую схему для оператора проектируемой машины. В этот же период необходимо провести предварительную экспертизу по вопросам охраны труда и окружающей среды с участием экспертов и представителей соответствующих государственных инспекций; по выбранному варианту разработать рекомендации для следующего этапа проектирования машины.

На основе выбранных вариантов осуществляют дальнейшее развитие инженерно-эргономических качеств машины на стадии технического проектирования. При этом, частности, уточняют перечень показателей эргономичности, обеспечивают информационную модель и потоки информации в контуре, рассчитывают психофизиологическую нагрузку по уточненным циклограммам, разрабатывают поведенческие модели (обоснование передаточных функций оператора), оценивают уровень автоматизации, определяют перечень технических средств обучения операторов. На созданных имитационных моделях и экспериментальных образцах проверяют основные эргономические показатели.

На опытных образцах в лабораторных условиях определяют объективные показатели по нормативам, а при натурных испытаниях оценивают основные показатели эргономичности в реальной



производственной обстановке, в частности, уточняют физическую нагрузку и психофизическую напряженность, измеряют величины параметров внешней среды.

Развитие эргономики позволяет уже сегодня полностью отказаться от интуитивного, сугубо эмпирического проектирования рабочего места на самоходных машинах. Вместе с тем темпы внедрения результатов эргономических исследований в инженерную практику, например, сельскохозяйственного машиностроения ниже, чем в других отраслях народного хозяйства. Для полноценного использования эргономики в проектировании машин необходимо разрешить ряд проблем, связанных со спецификой этой техники.

Конструктор не располагает достаточной информацией о факторах, определяющих взаимное влияние человека, машины и среды. Это вынуждает его обращаться к старым традиционным (отнюдь не лучшим) способам решения на основе так называемого здравого смысла. Приведем некоторые из проблем, требующие решения на новом, современном уровне.

Среди системных свойств, определяющих уровень эффективности работы СЧМ, важное место занимает совместимость оператора, машины и среды или взаимное соответствие сопряженных между собой звеньев системы, составляющее общую функциональную гармонию, дающую на «выходе» СЧМС наилучшие из возможных режимов.

В практике проектирования машин инженерно-эргономическая совместимость оператора и машины реализуется



на уровне чисто эмпирического, а порой интуитивного подхода и поэтому всецело зависит от опыта и квалификации конструктора. В этом аспекте заслуживает внимания опыт включения совместимости в круг задач оптимизации СЧМС. Свойство совместимости понимается в этом случае как «наличие» у составных частей системы потенциальной возможности функционировать совместно и достигать при этом заданной цели. Совместимость в определенных границах можно регулировать, и тогда она выступает как отличный инструмент для управления свойствами, качеством и эффективностью СЧМС.

Какие же виды совместимости преобладают в СЧМС и как их определяют специалисты? Основные виды совместимости информационная, энергетическая, биотехническая, пространственно-антропометрическая и технико-эстетическая совместимости [3, 16]. Однако не все они достаточно изучены. Рассмотрим для примера некоторые из них.

Соответствие оператора, машины и среды окружения по информационным показателям изучено недостаточно, поэтому меры по ограничению информационной нагрузки на оператора научно не обоснованы. В частности, при разработке индикации органов управления и контроля и при определении наиболее выгодного варианта расположения пультов индикации возможности операторов машин учитываются не достаточно.

Энергетическое соответствие звеньев СЧМС при проектировании машин всех видов не имеет теоретической основы. Как известно, при проектировании рабочего места оператора следует



учитывать, что человек снижает свои функциональные возможности с ростом энергетической нагрузки на его организм (это сверх такого важного фактора, как сохранение здоровья и работоспособности оператора). Несомненно, существует энергетический предел нагружения человека-оператора функциями управления. Повышение такого предела повлечет за собой невыполнение функций, снижение качества работы, производительности труда; повысится степень опасности повреждения здоровья человека и конструкции машины. Вместе с тем методы регистрации и оценки энергозатрат организма оператора машины и влияние их на работу системы разработаны недостаточно. Отсутствие соответствующих эргономических требований и ограничений приводит конструктора к произвольной недооценке совместимости оператора, машины и среды. Приведенные примеры отражают общее положение со всеми видами совместимости в СЧМ и подтверждают необходимость дальнейшего изучения и научного обоснования их характеристик.

Что же нужно для решения вопросов проектирования рабочих мест и всей системы «человек – машина» на новом научно-техническом уровне?

Конструктор должен располагать (кроме ГОСТов и нормативов) достаточным спектром данных, параметров, определяющих сбалансированное совмещение возможностей человека, современной машины и среды окружения. Эти сведения должны быть строго научно обоснованными. Получить их можно только путем тщательных исследований СЧМС с обязательным участием инже-



неров, специалистов в области эргономики, инженерной психологии и физиологии труда, математиков.

Анализ данных об эргономичности и условиях труда операторов машин определил следующие основные направления научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по оптимизации СЧМС:

- разработка кабин, отвечающих требованиям эргономики по энергозатратам человека-оператора (соответствие системы управления машиной функциональным и энергетическим возможностям человека), по микроклимату (температура, влажность, давление, скорость движения воздуха), по размерам, по обзорности, герметичности и защите от солнечной радиации, по вентиляции и очистке воздуха от пыли и загазованности, по освещенности, шуму, вибрации;
- разработка новых систем управления с улучшенными эргономическими характеристиками, исключающими психонервное перенапряжение оператора;
- создание шумовиброзащитного комплекса, включающего шумозащитные средства и виброзащитные кресла операторов, отвечающие требованиям по уровню низкочастотных колебаний;
- решение задач совместимости.

Перед инженерной эргономикой стоит задача осуществить поиск математических мер совместимостей, формализовать и просчитать информационную модель, обосновать поведенческие мо-



дели, рассчитать психофизиологическую нагрузку, оценить уровень автоматизации эргатической системы, провести детализацию и изучение других эргономических вопросов в зависимости от конкретных особенностей проектируемой СЧМС.

Роль и место эргономики в проектировании машин меняется по мере внедрения в процесс проектирования инженерно-эргономических и инженерно-психологических методов.

Обоснование функции человека и машины в СЧМ должно исходить из количественной оценки выполнения задач каждым звеном системы. Критерии таких оценок еще недостаточно разработаны, но это не может быть причиной отхода от проектирования человеко-машинной системы. Задача состоит в том, чтобы с начала проектирования машин разработчик создавал не только технические средства, приспособляемые к оператору, а проектировал систему (например, СЧМ).

2. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И МАШИНЫ

2.1. Человек как звено системы.

Человек-оператор является неотъемлемой частью работы всех систем. Он решает, где и как использовать самоходную машину, вводит входную информацию в машину, и сам выполняет операции, основанные на информации, получаемой от машины в процессе работы. Максимальная производительность машин может быть реализована только тогда, когда человек правильно



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

эксплуатирует и хорошо обслуживает их. Поэтому для того, чтобы система (СЧМ) работала эффективно (как с экономической, так и социальной точки зрения), в самом начале проектирования необходимо учитывать возможности и способности человека как основного звена системы «человек – машина». Рассмотрим взаимодействие человека и машины на примере работы оператора – комбайнера самоходной уборочной сельскохозяйственной машины.

Оператор, руководствуясь информацией (сигналы, подаваемые индикаторами в кабине, визуальное наблюдение за участком уборки и территории фронта работ), управляет машиной, воздействуя на органы управления. Одновременно человек реагирует на значительный комплекс внешних факторов. К ним относятся шум, создаваемый при работе двигателя и механизмов машины, вибрация и толчки на рабочем месте, сигналы обратной связи, поступающие к мышцам оператора от рулевого управления, рычагов и педалей, звуковые сигналы систем контроля и управления, сигнализирующие об отклонении от нормального режима работы механизмов, температурные колебания, состояние воздушной среды и др. Исходя из информации, получаемой от поступающих сигналов, оператор принимает решения и воздействует на органы управления. Машина, исполняя сигналы управления, изменяет позиции, рабочие параметры и подает оператору машины новую информацию.

Взаимодействие человека и машины в рассмотренном случае характеризуется непрерывностью и представляет собой сис-



тему с замкнутым контуром, в которой информация о сигнале на выходе подается обратно к начальному звену системы. Система с разомкнутым контуром не располагает обратной связью, и в ней взаимодействие между человеком и машиной носит прерывистый характер.

Рассмотрим процесс, в котором оператор корректирует работу машины, непрерывно пытаясь устранить разницу между потребным и реальным выходными сигналами системы, иными словами, обратимся к процессу ручного слежения. Условимся, что вход – это информация, воспринимаемая оператором, выход – действия оператора.

При ручном слежении корректирующие действия оператора близки к задачам, которые решает сервомеханизм. К устройствам такого рода относят исполнительные механизмы, которые перемещают регулирующий орган в соответствии с выходным сигналом регулятора. Здесь определенный параметр выхода оценивается и используется как вход другого устройства, которое действует как корректор, устраняющий (или сводящий до минимума) внешние возмущения. Устройство системы управления парораспределением паровых машин, в том числе железнодорожных локомотивов первого поколения, - это один из первых сервомеханизмов, примененных в машиностроении в начале XX в. Другими примерами более поздних устройств с обратной связью, у которых выход строго подчиняется заданному входному сигналу, могут служить системы водоснабжения, управляемые электрогидро-насосами, или системы отопления, регулируемые термостатами.



Можно сказать, что сервомеханизмы относятся к устройствам, которые хорошо управляются по известным законам при относительно небольшом числе степеней свободы.

Оператора самоходной машины можно рассматривать как органическое звено системы, исполняющее функции восприятия, переработки информации и управления (рис. 2.1). При этом условно выведены за пределы машины индикатор и органы управления машины, представляющие собой как бы узел «стыковки» оператора и машины.

Оператор, находящийся между индикатором (панельным устройством) и органом управления, воспринимает непрерывно изменяющуюся информацию Y_n и, воздействуя на органы управления Y_o , управляет работой машины. Входные импульсы отображаются машиной на индикаторе, информацию считывает оператор, который предпринимает определенные действия по управлению машиной. Выходной сигнал органов управления Y_c преобразуется машиной в выходной сигнал машины Y_m или всей системы $Y_{счм}$. Таким образом, для оптимизации системы еще в стадии проектирования необходимо учитывать все возможности и ограничения человека, управляющего машиной.

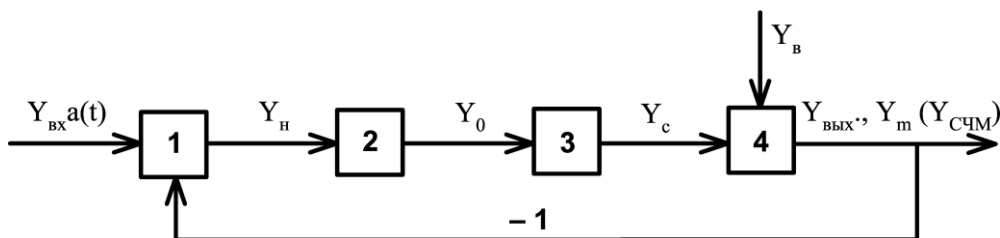


Рис. 2.1. Схема взаимодействия оператора и машины:

1 – индикатор; 2 – человек-оператор; 3 – органы управления; 4 – машина; $Y_{вх}$ – входной сигнал; $Y_{н}$ – непрерывно изменяющаяся информация; $Y_{о}$ – воздействие на органы управления; $Y_{с}$ – выходной сигнал органов управления; $Y_{вых}$, $Y_{м}$ ($Y_{СЧМ}$) – выходной сигнал машины; (- 1) – отрицательная обратная связь.

Знание возможностей оператора позволит при проектировании системы правильно распределить функции между человеком и машиной. В этой связи полезно сделать сравнение звеньев СЧМ.

2.2. Сравнение звеньев системы «человек – машина».

В процессе проектирования рабочего места конструктору приходится решать вопрос: какая часть задания в работе системы должна быть поручена человеку. Здесь необходимо принимать во внимание различие возможностей человека и машины, обладающих своими преимуществами и недостатками. Это позволит улучшить сбалансированное взаимодействие человека и машины, повысить управляемость машины [2], надежность и безопасность



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

работ и, в конечном счете, поднять эффективность всей системы.

Для облегчения принятия достаточно обоснованного решения конструктору рекомендуется в каждом конкретном случае применять простой метод сопоставления преимущественным показателей каждого звена системы «человека – машина» (табл. 2.1.).

Таблица 2.1.

Сопоставление возможностей человека и машины в система «человек – сельскохозяйственная машина».

Человек-оператор	Самоходная уборочная СХМ
Обнаружение неисправностей в двигателе, механизмах и узлах машины и обеспечение технической готовности к работе	Безопасность техники, средства оповещения и защиты от внезапного повреждения организма или вредных воздействий среды
Реакция на широкий диапазон сигналов с низким энергетическим уровнем	Защита узлов и механизмов от повреждений, обусловленных изменениями параметров внешней среды



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

<p>Плавное снижение своих показателей в экстремально неблагоприятных условиях, перегрузках (в отличие от внезапных помех в машине) и продолжительность действия в сложной ситуации</p>	<p>Работа в условиях опасных, вредных или совершенно не приемлемых для организма человека</p>
<p>Способность воспринимать информацию о ситуации уборки урожая и работе машины по индикаторам и системам управления внутри кабины</p>	<p>Передача больших усилий при относительно точном и постепенном их приложении</p>
<p>Реакция на изменение параметров внешней среды в кабине и вне ее. Способность принимать решение при внезапном, непредвиденном изменении ситуации в чрезвычайно широком диапазоне</p>	<p>Выполнение широкого круга разнообразных действий (например, операций от начала уборки зерновых до выгрузки зерна из бункера машины в кузов транспортного средства и выброса копны)</p>
<p>Нахождение решений, выводящих из аварийных ситуаций и повреждений машины</p>	<p>Выполнение многочисленных операций (однообразны, монотонных, точных) в течение длительного времени</p>



Хранение информации и использование ее в соответствующей ситуации	Отсутствие реакции на некоторые неблагоприятные факторы окружающей среды
---	--

2.3. Надежность системы «человек – машина».

В процессе проектирования, решая задачу правильного использования возможностей человека и разделения функций человека и машины, следует уделить внимание высокой надежности работы оператора и тем самым обеспечить надежность всей системы, т. е. главная задача здесь состоит в максимальном уменьшении вероятности ошибок человека-оператора [4]. Надежность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности принятия решений. Для часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности иногда используют интенсивность ошибок, вычисляя ее в расчете на одну операцию по статистическим данным (по Б. А. Смирнову) [21] следующим образом:

$$P_j = \frac{N_j - n_j}{N_j} ; \quad (2.1)$$

$$\lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j} , \quad (2.2)$$

где P_j – вероятность безошибочного выполнения операции j -го типа; N_j, n_j – общее число выполняемых операций j -го вида и

допущенное при этом число ошибок; λ_j – интенсивность ошибок j -го вида; T_j – среднее время выполнения операции j -го вида.

Вероятность безошибочного выполнения операций зависит от уровня работоспособности, и формулу (2.1) считают справедливой лишь для периода устойчивой работоспособности оператора, которая отличается значительным подъемом производительности труда после выработки в начале смены (рис. 2.2).

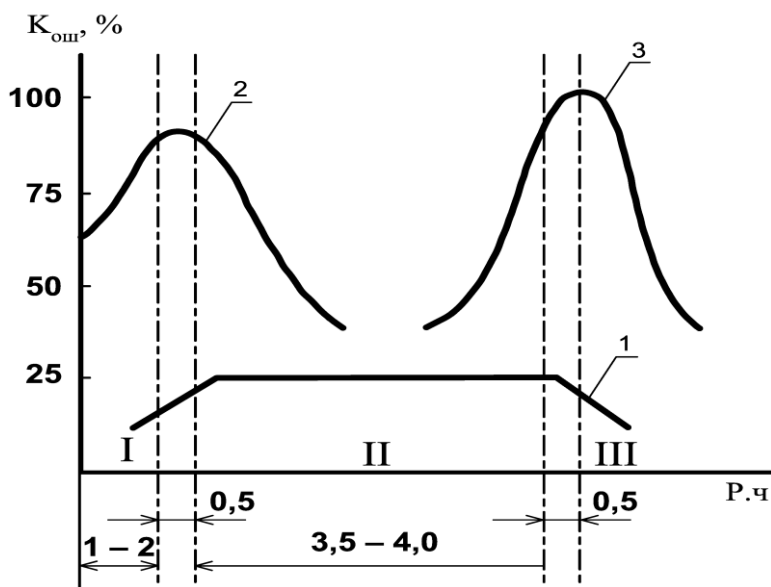


Рис. 2.2. Динамика надежности оператора в течение рабочей смены: 1 – кривая надежности; 2, 3 – кривые ошибок; I, II, III – фазы работоспособности.

Динамика работоспособности характеризуется тремя основными фазами: I – выработывающей работоспособностью, II – устойчивая работоспособность и III – спад в связи с естественным утомлением.



Незначительный спад наблюдается также приблизительно за 0,5 ч до обеденного перерыва, который в основном не связан с изменением работоспособности и поэтому на графике не учтен.

Тенденция распределения количества ошибок $K_{\text{ош}}$ в течение смены отражена кривыми 2, 3, наложение которых на график динамики работоспособности оператора "Р" показало, что большая часть ошибок в течение смены, а также негативных явлений, вытекающих из ошибок, например производственных травм, приходится на период, характеризующийся низкой работоспособностью (см. рис. 2.2). Период же устойчивой работоспособности (фаза II) отмечается наименьшим числом ошибок, допускаемых работающим в течение данной смены.

Ошибка человека определяется как неправильное выполнение трудовой операции, ведущее к нарушению стандартов технологии и безопасности труда, она может привести к браку в работе, аварии, повреждению оборудования, производственной травме.

При эксплуатации машин, какой бы ни была степень их автоматизации, требуется участие человека-оператора, который не гарантирован от ошибок, независимо от уровня профессиональной подготовки и опыта. Поэтому изучение и прогнозирование надежности СЧМ без учета надежности работы человека не может дать правильных результатов.

Проектировщики пока еще не располагают количественными данными о надежности человека. Для решения чрезвычайно трудной задачи повышения безошибочности действий оператора



желательно рассмотреть: 1) основные функциональные, антропометрические и энергетические возможности человека-оператора; 2) характеристики человека-оператора, связанные с видами его деятельности и влиянием нежелательных факторов окружающей среды.

В первом случае надо учесть, что основные функциональные и антропометрические данные человека установлены довольно точно [7]. Значительную трудность составляет определение энергетики организма оператора, возможности которой не изучены, хотя этот показатель, очевидно, имеет прямую связь с надежностью работы СЧМ.

Предпринимавшиеся попытки разработать условные модели энергетики организма весьма полезны в развитии науки о СЧМ, но они имеют предположительную форму и основываются на параметрах систем, включающих летательные аппараты и машины. Поэтому эти данные не могут быть в полной мере использованы при разработке самоходных машин, так как не позволяют составить достаточного представления о влиянии энергетической нагрузки на надежность действий человека-оператора машины.

Безошибочность действий оператора имеет прямую связь с производительностью системы, поэтому проблема изучения энергетики организма оператора машины и ее влияния на функциональное состояние человека при проектировании машин будущего поколения чрезвычайно актуальна.

В результате энергетических перегрузок, обусловленных комплексом дополнительных энергозатрат, появляются ошибки, ко-



торые можно рассматривать как отказ звена человека, снижающий производительность системы. Поэтому при выборе содержания рабочего задания следует учитывать весь комплекс нагрузок, возлагаемых на оператора.

Снижение энергетической нагрузки на организм человека в значительной мере может быть достигнуто передачей части функций управления и контроля от человека машине. Эти вопросы взаимосвязаны с компоновкой оборудования в кабине, с выбором эффективного варианта расположения средств «стыковки» машины с оператором.

Второе направление решения задачи повышения надежности оператора связано с рассмотрением зависимостей между характеристиками человека и определенными факторами, понижающими безошибочность его действий. В этом случае целесообразно классифицировать виды деятельности операторов по конкретным типам машин. Например, у водителя трактора будут иметь место реакции: на различные дискретные сигналы, поступающие к рабочему месту оператора; на различные простые сигналы подаваемые последовательно; на сигналы, связанные с согласованием действий с другим оператором.

Для оператора самоходного зерноуборочного комбайна, кроме указанных выше, характерны:

- реакция на последовательные сигналы различного значения, связанные с оценкой обстановки и принятием решения;
- реакции комплексного характера, требующие согласованности с другим оператором (например, с водителем транс-



портной автомашины при выгрузке зерна из бункера).

При выборе содержания рабочих функций с целью увеличения скорости реакции человека и безошибочности его действий следует учитывать отрицательные факторы внешней среды: шум двигателя и движущихся частей механизмов; вибрацию и толчки в кабине; солнечную радиацию; ненормальные температурные условия; повышенную запыленность и загазованность; физические и психические перегрузки; недостаточную обзорность с рабочего места (вынужденное напряжение рабочей позы); недостаточную совместимость оператора, машины и среды.

2.4. Анализ проектируемой системы.

В эргономике еще нет установившихся концептуальных схем анализа системы, поэтому проектировщикам приходится использовать методы и схемы анализа смежных наук, трансформируя их в соответствии с конструкторскими задачами, которые ставит практика создания новых самоходных машин. Перед учеными этой отрасли стоят сложные задачи, среди которых важное место занимает ориентировка исследований на опережающий поиск и прогнозирование путей, методов решения конструкторских задач оптимизации СЧМ [12]. Пусть конструкции будущих самоходных машин самого разнообразного назначения будут рассматриваться пока еще в гипотетической форме научного прогноза, специалистам так или иначе предстоит решать задачи создания самоходных машин, работающих в самых неожиданных условиях окружающей среды, вплоть до параметров ранее неведомых гравита-



ций, метеоусловий и т. д. В любом случае проектирование СЧМ должно включать рациональный анализ системы.

Информация о каждом из звеньев создаваемой СЧМ может быть получена с помощью анализа системы, позволяющего описать все звенья и их рабочие характеристики, составить представление о структуре, функциях и процессах в СЧМ.

Анализ системы позволит осуществить планирование разработки, включить в поле видения конструктора основные проблемы машиностроения, упущение которых может принести непоправимый вред системе; выявить узлы и конструкции, препятствующие повышению эффективности СЧМ; решить задачи совместимости и разделения функций между человеком и машиной; сопоставить с другими системами и выбрать критерии для оценки эффективности проектируемой системы.

Взяв при проектировании машины за исходный тезис «Машины проектируются для человека труда», рассмотрим методы анализа проектируемых систем, уделив должное внимание факторам, определяющим удобства оператора машины. Однако следует предостеречь от ошибочной трактовки положения о создании комфорта для человека-оператора, ибо это понятие в СЧМ несколько отличается от общепринятого понятия комфорта в быту.

Если анализировать деятельность человека в отрыве от управляемой им техники и представлять цель инженерной эргономики и ее исследований как максимальное улучшение комфортных условий для его деятельности вне связи с эффективностью всей системы на выходе (т.е. с производительностью СЧМ в



целом) то, видимо, такая крайность может стать серьезным препятствием в оптимизации СЧМ. Оператора машины мы должны рассматривать не только как потребителя машины, но и как производителя материальных благ, решающего конкретную задачу. Поэтому при изучении методов анализа проектируемой системы должно быть особое внимание уделено человеку как звену СЧМ.

Первым шагом анализа является построение полной системы, в которую войдут характеристики условий работы машины и оператора.

Общие требования к системе включают задачу системы и конструктивную компоновку самоходной машины; наивыгоднейшую модификацию; условия эксплуатации и характер участков работы; критические параметры системы, ограничивающие ее габариты, вес, мобильность; возможности использования СЧМ в зависимости от ситуации.

Средства управления, контроля и кондиционирования среды на рабочем месте должны удовлетворять основным требованиям, определяющим эффективность работы СЧМ и, в частности, оператора.

Для удобства проведения анализа при наличии большого объема данных рекомендуется всю информацию сосредоточить в специальной книге, закодировав каждый из параметров условными знаками (цифрами или буквенными), и нанести эти знаки на схему для быстрого отыскивания.

Анализируя комплекс оборудования рабочего места, прежде всего необходимо составить функциональную схему рабочего



места машины (рис. 2.3), на которой должны быть представлены средства всего комплекса оборудования рабочего места оператора, характерные и для других современных рабочих машин, где оператору приходится управлять не только движением машины, но и рабочими органами и осуществлять контроль за ходом технологического процесса и внешней средой.

2.5. Классификация параметров комплекса. Оборудования рабочего места (КОРМ) и критерии качества.

Задача синтеза в начальной стадии проектирования заключается в поиске и выборе системы, удовлетворяющей исходным параметрам и высокому качеству создаваемого изделия. Для решения этой задачи конструктору необходимо выделить из всей совокупности данных такие параметры и характеристики, которые позволят путем варьирования повысить эффективность (качество) системы.

Совокупность данных, определяющих качество системы, можно представить в виде сгруппированных параметров: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 \dots \mathcal{E}_n$ – эксплуатационные условия, определяющие назначение самоходной машины (в том числе КОРМ) и воздействия внешней

среды; $O_k = O_{k^1} \dots O_{k_n}$ – ограничения в выборе компоновки систем и комплексов с учетом габаритов, стандарта и других нормативных требований; $K = K_1, \dots, K_n$ – показатели качества в виде заданных характеристик: обзорность (поле зрения оператора),



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем
«Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

микроклимат (температура, влажность, скорость движения воздуха), кратность обмена и чистота нагнетаемого воздуха, уровни шума и вибрации, усилия, необходимые для приведения в действие ручных и ножных органов управления, расположение органов управления и средств индикации и др.; $O_{п1}, O_{п2}, \dots, O_{пn}$ – ограничения на показатели качества по производству, существующим технологическим процессам, уровню технических и экономических возможностей современного машиностроения.

Оптимальным из всех возможных конструктивных решений будет то, которое удовлетворяет условиям $\Delta, O_{к}, O_{п}$, и наилучшей – та система, которая характеризуется самым высоким общим показателем качества K . Критерий оптимальности K должен быть определен предварительно из условия эргономической и экономической предпочтительности по сравнению с другими вариантами решений. Отсюда следует, что задача конструктора заключается в отыскании такой системы, которая будет удовлетворять исходным параметрам $\Delta, O_{к}, O_{п}$ при оптимальном значении K , соответствующем установленным стандартам для каждого из факторов, входящих в этот показатель.

Формирование комплексного показателя качества (частный синтез) можно рассмотреть на примере определения K для системы, создающей в кабине оператора оптимальный микроклимат. Для этого образуем скалярное выражение для K , состоящее из суммы показателей качества:

$$K = a_v V + a_t t + a_\phi \phi + a_p p + a_w W + \dots + a_T T,$$

где V, t, ϕ, v, p, W, T – объем кабины, температура, влаж-



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

ность и скорость движения воздуха, давление, мощность, потребляемая кондиционером или вентиляционно-отопительной системой, срок разработки; все эти величины (кроме T) нормированы и могут быть определены из O_k и O_n ; $a_v \dots a_T$ – коэффициенты значимости, определяемые методом экспертных оценок

$$0 \leq d_i \leq 1.$$

Варьируя величиной K с учетом ограничений O_k и O_n для разных систем $C(1), \dots, C(n)$, получим массив рассмотренных решений:

$$C_1 K :_1 = a_v V_{(1)} + a_t t_{(1)} + \dots + a_T T_{(1)};$$

$$C_n K :_n = a_v V_{(n)} + a_t t_{(n)} + \dots + a_T T_{(n)}.$$

Оптимальной следует считать систему (или устройство), у которой из всех $K_{(1)}, \dots, K_{(n)}$ комплексный показатель K_1 будет ближе к нормированной величине (или заданному уровню значений параметров).

Заметим, что научно-технический уровень развития машиностроения (равно как и других отраслей техники, включая и уровень достижений проектно-конструкторских работ) определяется относительным показателем качества, представляющим собой отношение материальных показателей (масса, объем, стоимость и т.д.) к функциональным, вытекающим из назначения проектируемого объекта и характеризующим его свойства (возможности).

Инженерный синтез, основанный на комбинации математических и эвристических данных, включает стадии: синтез, структуры, системы, устройства; выбор наилучшего решения системы по критерию качества K . Синтез систем, комплексов оборудова-



ния и устройств рабочего места должен быть начат на самой ранней стадии проектно-конструкторских работ при рассмотрении технического задания и далее продолжаться на всех остальных стадиях работы во избежание принятия решений, несовместимых с новейшими представлениями о надежности, безопасности и комфорте рабочего места оператора. К выполнению проектно-конструкторских разработок рабочего места, при которых для принятия правильного решения требуется учитывать взаимодействие целого спектра разнообразным факторов, необходим системный подход. Общие правила системного подхода к проектированию сложных объектов уровня КОРМ, которые должны учитываться при проектировании самоходных машин, сводятся к следующему.

1. Система рассматривается как единое целое, учитывающее взаимодействие между всеми ее элементами и между системой ее окружением.

2. Порядок создания комплексов рабочих мест основан на принципе проектирования систем, включающих обоснование исходных данных для следующего «низшего» устройства, выборе характеристик для этого устройства и т.д. «вниз» по схеме. Оптимизация системы, выполненная на том или ином уровне, непосредственно влияет на качество следующего (рангом ниже) уровня. Такая взаимосвязь характерна для всех систем, входящих в многоуровневую структуру частных систем комплекса оборудования рабочего места (КОРМ).

3. Оптимальный инженерный синтез является сквозным



процессом, представляющим собой ряд последовательно чередующихся работ на всех стадиях проектно-конструкторских разработок.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА МАШИН

3.1. Рабочее место оператора.

Рабочее место оператора самоходных машин – это постоянное, индивидуальное (передвижное) место работы специалиста, оснащенное органами управления и контроля, средствами отображения информации, оборудованием, обеспечивающим оптимальную среду удобства и безопасности труда.

Рабочее место современных сложных машин характеризуется наличием комплекса технических средств, управляющих не только самой машиной, но и средствами взаимодействия человека с машиной, средствами нормализации среды на рабочем месте. Некоторые авторы [1] квалифицируют их как вспомогательные средства воздействия, однако если рассматривать СЧМ как систему, в которой человек есть главное звено, то эти средства не могут быть отнесены к разряду вспомогательных, а должны входить как неотъемлемая часть системы, без которой управление невозможно, так как оно становится угрозой здоровью и работоспособности человека, а следовательно, фактором, нарушающим нормальное протекание трудовой деятельности человека.

Новые машины не могут рассматриваться изолированно, без



научной оценки и учета степени вредного влияния многообразного спектра факторов окружающей среды на здоровье и работоспособность человека. Вместе с тем практика отработки проектов рабочих мест не часто предоставляет возможность обеспечить оптимальные условия оператора, поэтому при системном подходе рекомендации должны побуждать конструктора к поиску наилучшего компромиссного решения. Прежде чем приступить к разработке, конструктор должен иметь в своем распоряжении полную информацию о требованиях, предъявляемых к конкретному устройству рабочего места. Основные из них будут приведены ниже.

Перед конструктором рабочего места в СЧМ прежде всего стоит задача подбора и разработки таких средств взаимосвязи (органов управления и контроля) и средств оптимизации среды на рабочем месте, которые обеспечат выполнение всего комплекса параметров условий труда, предусмотренных системой стандартов безопасности труда (ССБТ). При этом следует не только учесть, но и превзойти лучшие аналоги в мировой технике. Расчет и подбор конструктивных параметров рабочего места в этом случае представляет собой вариационную задачу, в частности отыскания экстремумов для функции нескольких переменных при условии получения минимума вредных воздействий на организм человека и максимальной работоспособности в течение рабочей смены. Работоспособность оператора во многом зависит от условий труда, характеризующихся показателями эргономичности рабочего места. Такие показатели по данным отдельных полевых исследований самоходных машин в большинстве случаев превыша-



ют установленные нормами и стандартами предельно допустимые уровни. В реальной рабочей обстановке возмущающие факторы действуют на СЧМ и в том числе на человека одновременно. Такое комплексное влияние вредных факторов полностью не изучено, и это обязывает конструктора придерживаться самых жестких (наименьших) пределов допускаемых уровней и концентраций вредностей, уделяя особое внимание тем случаям, когда возникает опасность одновременного воздействия на человека нескольких вредных факторов.

С целью установления жесткого контроля за санитарно-техническим состоянием техники для каждой машины должен быть составлен и утвержден Государственной санитарной инспекцией санитарно-технический паспорт (СТП) с указанием в нем допустимых и фактически обеспеченных на рабочем месте санитарно-гигиенических значений микроклимата, шума, вибрации, освещенности, усилий на органы управления и других параметров, установленных государственными стандартами нормами и правилами.

Руководствуясь санитарно-техническим паспортом и данными стандартов и норм, конструктор всегда старается ориентироваться на параметры с «опережением». Это означает, что достижение лишь допустимых параметров (и то иногда с натяжкой) при изготовлении рабочей машины типа самоходных машин не может быть критерием лучшего решения конструкторской задачи, так как при эксплуатации машины в связи с неотвратимым износом механизмов и их деталей уровни вредных факторов, например



шума, вибрации и прочих, увеличатся, ухудшая характеристики системы. Поэтому рациональные действия конструктора состоят в следовании принципу «опережения» (возможного ужесточения параметров), учитывающему естественный «снос» показателей.

При конструировании комплексов оборудования рабочего места машины следует четко определить:

- цель конструирования рабочего места – создание удобных, безопасных производительных условий труда, способствующих повышению эффективности проектируемой СЧМ;
- средства оптимизации – обеспечение конструктора до начала разработок всей существующей информацией о требованиях к рабочему месту на мобильных транспортных средствах и самоходных машинах.

В информацию, которой должен располагать конструктор, входят следующие основные вопросы:

1. задачи проектируемой СЧМ;
2. оптимальные методы и этапы решения конструкторской задачи;
3. условия окружающей среды: параметры микроклимата, чистота воздуха, шум, вибрация, освещенность, обзорность, солнечная радиация и т.д.;
4. допустимые и оптимальные отклонения характеристик работы системы (например, производительность, скорость и т.д.);
5. влияние отклонения характеристик и параметров на работу СЧМ;
6. алгоритм действий оператора (последовательность тру-



довых операций) с выделением основных операций и показом времени их выполнения;

7. антропометрические данные оператора для проектируемых машин и требования к объему свободного пространства;

8. информация оператора: входная – необходимая для осуществления оператором функций управления, выходная – вырабатываемая оператором с целью воздействия на систему.

Особое место занимают нормативная документация и стандарты, содержащие методы оценки всего комплекса параметров, определяющих условия и требования безопасности труда оператора; в приложениях к стандарту приводятся рекомендуемые формы описания результатов испытания машин по всем показателям.

3.2. Работа оператора в положении «сидя» и «стоя»

Рабочая поза «сидя» имеет ряд преимуществ перед рабочим положением «стоя»: снижаются энергетические затраты организма человека, так как происходит расслабление отдельных групп мышц, наступает разгрузка работы сердечно-сосудистой системы, уменьшается нагрузка на мышцы, поддерживающие тело в равновесном состоянии, что способствует снижению утомления. В сидячем положении человек может выполнять легкую работу руками и тяжелую ногами значительно более длительное время, чем в рабочей позе «стоя»; при этом его организм защищен от резких толчков, качки, вибрации, а руки и ноги высвобождены



для работы с органами управления; особенно облегчается работа с педалями.

При рабочей позе «сидя» уменьшается также нагрузки на мышцы спины, равномерно распределен вес по поверхности сидения, ослаблено напряжение мышц нижней части бедра.

Для этой рабочей позы характерны и свои недостатки. К ним следует отнести ограничение возможности изменять положение тела при работе, уменьшение зоны досягаемости, а также снижение возможности прилагать большую физическую силу. Длительная работа в положении «сидя» ведет к изменениям межпозвоночных связей и искривлению позвоночника, к расслаблению мышц живота, спины, к появлению сутулости. Особенно неблагоприятно отражается на деятельности организма неправильная поза, что вызывает преждевременную усталость, способствует деформации отдельных частей тела и снижению работоспособность человека.

На основе результатов многочисленных наблюдений за людьми, работающими в положении «сидя», установлено, что обычно 15 % из них сидят на передней части сиденья, 52 – посередине сиденья и 33 – на задней части сиденья, причем 42 % операторов опираются на спинку.

При компоновке кабины необходимо обеспечить выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля для работы «сидя» и «стоя» (рис. 3.1). При работе «сидя» область малой энергоемкости 1 расположена против груди оператора, ниже расположены зоны: 2 – оптимальной, 3 – легкой дося-

гаемости для часто используемых органов управления. В зоне 4 следует располагать редко используемые органы управления.

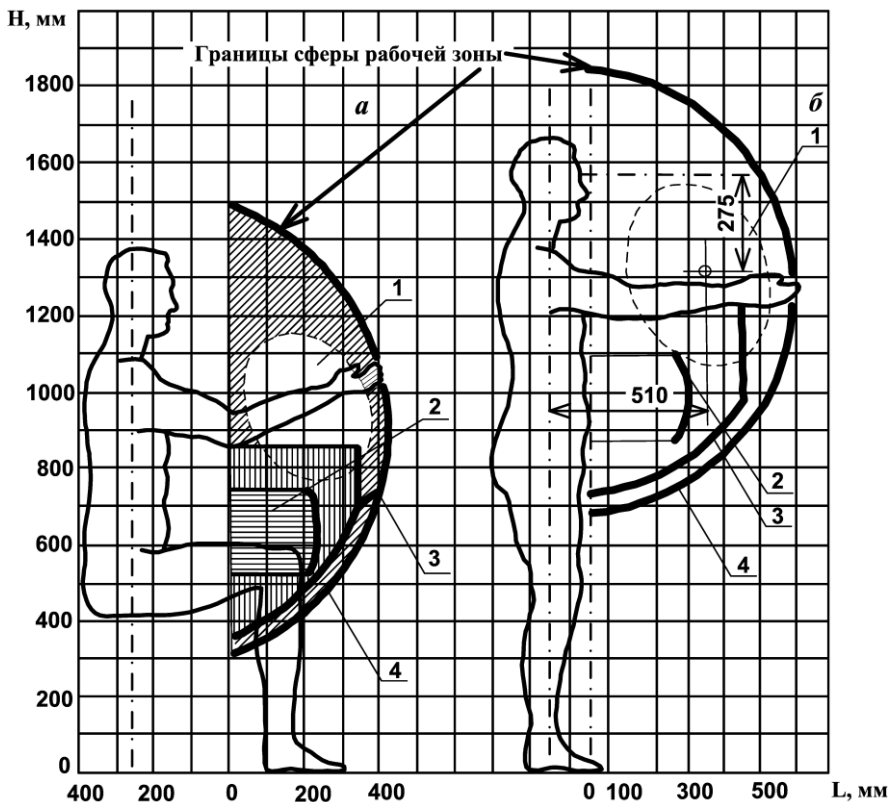


Рис. 3.1. Границы зон вертикального моторного поля для работы «сядя» (а) и «стоя» (б):

1 – контур области малой энергоемкости; 2 – зона оптимальной досягаемости для расположения очень часто используемых органов управления; 3 – зона легкой досягаемости для часто используемых органов управления; 4 – зона досягаемости для редко используемых органов управления.

Для работы в положении «стоя» наиболее часто используе-

мые органы управления надо располагать в зоне малой энергоемкости 1 или оптимальной (наименьшей) энергоемкости, а редко используемые органы управления – в зонах 3 и 4 (см. рис. 3.3). На рис. 3.4 показаны аналогичные зоны в горизонтальной плоскости.

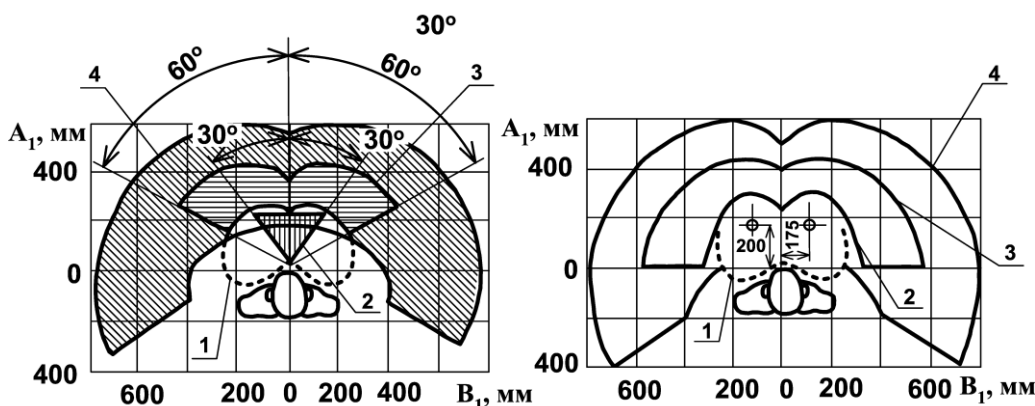


Рис. 3.2. Границы зон горизонтального моторного поля для работы «сидя» (а) и «стоя» (б) (обозначения см. на рис. 3.1.)

В процессе проектирования рабочего места оператора построение зон досягаемости (установление их размеров, объемов и т.д.) осуществляется во взаимосвязи с антропометрическими данными. При этом, как будет показано ниже, удобство с точки зрения человеческого тела разделяется на удобство статического и динамического соответствия. Динамическое соответствие включает не только размещение органов управления относительно оператора, но и приспособленность человека-оператора к комплексу оборудования и устройств рабочего места в процессе работы. Такое соответствие означает, что оператор имеет возможность осуществлять перемещение частей тела на различных



уровнях вперед, назад и в поперечном направлении.

С целью адаптации элементов комплекса оборудования рабочего места оператора к оптимальным зонам в кабинах предусмотрена возможность регулирования отдельных элементов. Регулируемые параметры высоты рулевой колонки (рулевого колеса) сиденья пространства для ног необходимо подбирать по номограмме (рис. 3.3), устанавливающей зависимость этих параметров от роста оператора.

За высоту рулевого колеса принимается расстояние по вертикали от пола кабины до центра рулевого колеса по оси колонки. Если рулевое колесо не регулируется по высоте, то высоту его выбирают по номограмме для оператора ростом 1800 мм, а оптимальная рабочая поза оператора ниже 1800мм достигается путем увеличения высоты сиденья.

Рабочее положение оператора «стоя» принимается в тех случаях, когда работающему необходимо часто менять положение тела, передвигаться в различных направления, обеспечивать большую зону досягаемости и более широкое (по сравнению с положением «сидя») поле зрения. Если такая свобода передвижений требуется только при отдельных трудовых операциях, т.е. не в течение всей рабочей смены, то рабочее место нужно проектировать так, чтобы работающий мог сидеть и стоять (поза «сидя-стоя»).

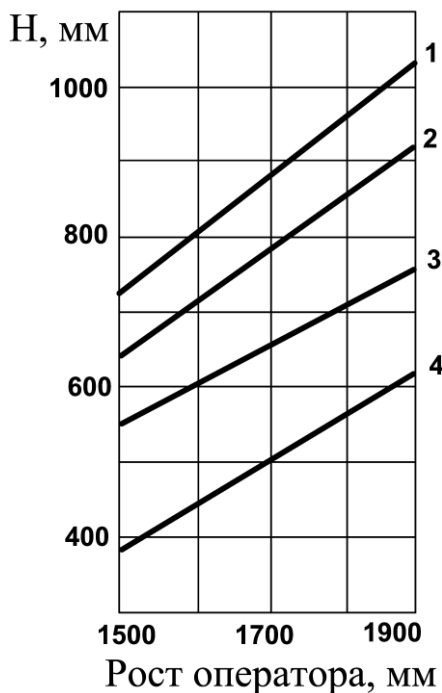


Рис. 3.3. Номограмма зависимости высоты расположения рулевого колеса, сиденья и пространства для ног от роста оператора для работы в положении «сидя»: 1 – высота для рулевого колеса при горизонтальном его расположении; 2 – для рулевого колеса по нижней точке при наклонном его положении; 3 – высота пространства для ног; 4 – высота сиденья оператора.

Во всех случаях проектирования рабочего места на самоходных машинах должно удовлетворять требованиям хорошей обзорности и зоны действия ручных и ножных органов управления. В положении «стоя» уменьшается зона управления ногами, тогда как в сидячей позе ограничены поле зрения и зона ручного действия оператора.



При работе стоя нельзя долго находиться в одном и том же положении, поэтому необходимо предусмотреть возможность изменения положения и обеспечения перерывов на отдых. Следует исключить неудобные позы, при которых тело, руки или ноги занимают неестественное с точки зрения физиологии положение и требуют мышечные усилия статического характера.

Рабочее место должно быть спроектировано так, чтобы трудовые действия осуществлялись в пределах зоны досягаемости моторного поля, а наиболее часто выполняемые операции – в пределах зон наименьшей (оптимальной) и малой энергоемкости или зоны легкой досягаемости моторного поля.

Организация рабочего места и конструкция оборудования должны создавать условия для прямого и свободного положения корпуса тела или наклона его вперед не более чем на 15°.

3.3. Рабочее сиденье оператора.

Рабочее сиденье должно соответствовать стандарту, действующему в период проектирования машины и распространяющемуся на соответствующие виды самоходных машин.

При проектировании и конструировании сиденья рабочего места оператора основные размеры, параметры, положения **точки отсчета сиденья** (ТОС) должны соответствовать нормам, указанным на рис. 3.4.

В процессе проектирования (как на производстве, так и в курсовом или дипломном проектировании в учебном процессе)



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

определяют координаты контрольной точки отсчета сиденья, которая обозначается как точка пересечения вертикальной плоскости, подходящей через ось сиденья, с теоретической осью поворота бедра относительно торса человека (практически это точка пересечения осей посадочного места и спинки сиденья, см. рис. 3.4.).

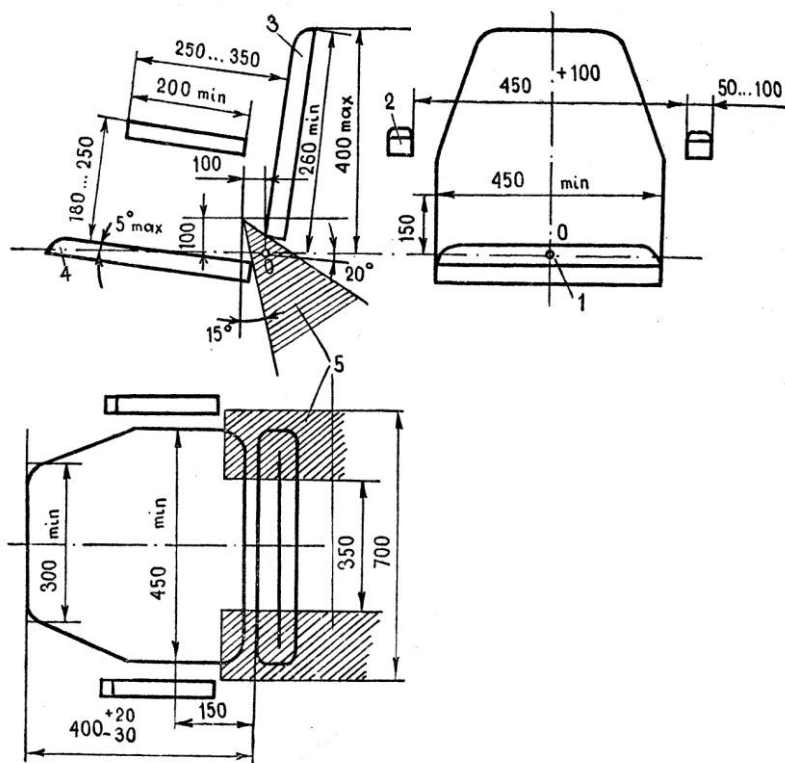


Рис. 3.4. Основные параметры и зона расположения ремня безопасности: 1 – точка отсчета сиденья (ТОС); 2 – подлокотник; 3, 4 – подушки; 5 – зона расположения крепления ремня.



Примечание. Чертеж не определяет конструкцию сиденья, размеры спинки даны при угле наклона к вертикали 5° ; высота спинки должна быть указана в технических условиях на конкретную модель машины.

Для определения контрольной точки отсчета сиденья применяется специальное устройство, показанное на рис. 3.5, масса которого должна составлять $58,9 \pm 9,8 \text{ Н}$ ($6 \pm 1 \text{ кг}$).

Метод определения ТОС следующий:

— сиденье покрыть куском ткани для облегчения правильного размещения устройства;

— поместить устройство на сиденье, сдвинув его назад и к спинке;

— установить дополнительные массы, доведя общую массу устройства от $58,9 \pm 9,8 \text{ Н}$ ($6 \pm 1 \text{ кг}$) до $255,7 \pm 9,8 \text{ Н}$ ($26 \pm 1 \text{ кг}$);

— вертикальное усилие в результате дополнительных масс должно быть приложено на расстоянии 40 мм перед ТОС (точкой отсчета) (рис. 3.5);

— дважды приложить к устройству в точке ТОС горизонтальное усилие 100 Н, как показано на рис. 3.5;

— установить дополнительные массы, доведя общую массу устройства от $255,7 \pm 9,8 \text{ Н}$ ($26 \pm 1 \text{ кг}$) до $637,65 \pm 9,8 \text{ Н}$ ($65 \pm 1 \text{ кг}$);

— в двух вертикальных плоскостях проведенных с обеих сторон сиденья на равных расстояниях от продольной осевой плоскости сиденья, определить с точность $\pm 1 \text{ мм}$ координаты

точек пересечения этих плоскостей с осями ТОС (обозначенными на устройстве по центру).

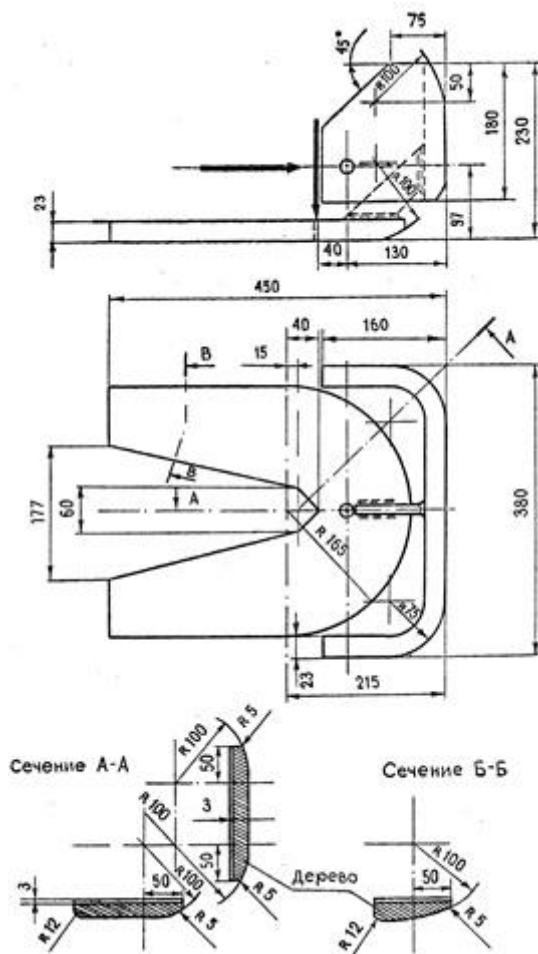


Рис. 3.7. Устройство для определения точки отсчета сиденья.

Разработка сиденья оператора машины при курсовых и дипломных работах должна содержать и элементы творческого ха-



рактера с учетом достижений научно-технического прогресса в отрасли, которые в большинстве случаев опережают стандарты, действующие по несколько лет. В ходе учебного процесса очень полезны предложения проектантов в части рационализации рабочего места. Поэтому наряду с использованием стандартов, содержащих готовые рекомендации, следует учитывать общие требования к проектированию сиденья.

При проектировании новых самоходных машин, управляемых человеком, преобладающее значение имеют введение устройств, позволяющих регулировать рабочее место в соответствии с размерами тела оператора. Важную роль в приспособлении рабочего места к антропометрическим характеристикам человека-оператора играет регулируемое кресло-сиденье. Регулируемые устройства для комплексов оборудования рабочего места (сиденье, рулевая колонка, органы управления, пульты и т.п.) в мировой практике создаются, как правило, совместными трудами инженеров-разработчиков машин со специалистами биомеханиками и электроники.

На рис. 3.6 показано регулируемое кресло (экспериментальное), созданное в лаборатории биомеханики французского Национального института транспорта и его безопасности.

Изменяя 12 параметров этого кресла – положение спинки, сиденья и т.д., можно подобрать наиболее комфортный для оператора вариант и исследовать взаимосвязь регулируемых параметров. Регулировка в основном производится нажатием кнопок на пульте (справа от руля). В спинку сиденья вмонтированы дат-

чки для определения положения позвоночника сидящего оператора-экспериментатора.

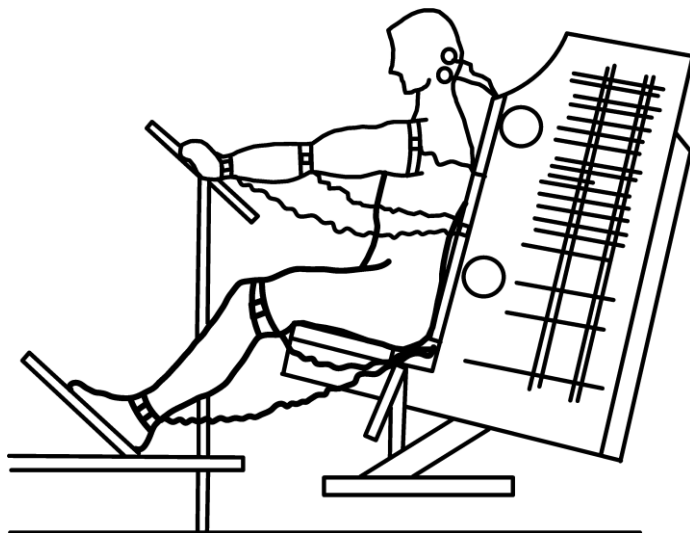


Рис. 3.6. Экспериментальное регулируемое кресло.

Что следует принимать во внимание при конструировании рабочего сиденья оператора новых сельскохозяйственных машин?

В конструкции сиденья, обеспечивающего физиологически правильную и удобную позу оператора, учитываются характерные особенности трудовой деятельности, антропометрические и физиологические данные, полученные путем анализа рабочей позы при выполнении конкретного вида работ. При выборе формы сиденья необходимо принимать во внимание не только анатомию человека, но и динамику его рабочих движений. Сиденье должно оптимально способствовать выполнению производственного процесса. Наиболее удобное положение тела в рабочей позе «сидя»



достигается при разнице высот нижнего края колеса рулевой колонки и сиденья в 250–290 мм.

Спинка кресла должна способствовать естественному наклону таза и позвоночника сидящего человека и не ограничивать зоны досягаемости рук, ее верхняя часть располагается под лопатками на уровне 330–360 мм над сиденьем. Если кресло не имеет спинки, напрягаются и утомляются мышцы спины оператора. В таких случаях необходимо обеспечить опору для нижней части рук и локтей.

При выборе или оценке целесообразности данной конструкции рабочего сиденья, т.е. при определении его функционального назначения, следует учитывать:

- конкретное назначение сиденья и рабочего места, взаимосвязь между сиденьем и рулевым колесом, зоной досягаемости, органами управления и важнейшими элементами рабочего места;
- физическую или активную механическую нагрузку, объем и вид нагрузки (например, сила, необходимая для манипулирования организмом управления, переключения педалей и т.д.);
- необходимые рабочие положения и движения рук, ног, корпуса тела; возможность опереться на локти или на ноги, откинуться на спинку кресла и т.д.;
- воздействие внешних сил на сидящего (изменение скорости движения, вибрация и толчки влияют на устойчивость сиденья);
- антропометрические данные оператора;
- возможность манипулирования сиденьем (регулировка в вертикальном и горизонтальном направлениях, поворот вокруг оси).



Удобство и физиологическая приемлемость сиденья зависят от выполнения основных требований эргономики, т.е. обеспечения:

- возможности изменения положения тела при работе «сидя» в течение всей смены (надлежащая конструкция сиденья обеспечивает возможность принимать различные удобные рабочие положения «сидя» и определенную свободу движения конечностей);
- регулировки высоты сиденья в пределах 370–520 мм и спинки кресла – 650–750 мм в зависимости от высоты его рабочей поверхности и роста оператора;
- достаточного закругления переднего края сиденья (с радиусом около 30 мм), отсутствия давления на нижнюю часть бедер, препятствующего кровообращению;
- наклона опорной поверхности назад на угол 3–5° в зависимости от характера работы;
- вогнутой формы опорной поверхности сиденья радиусом около 850 мм, которая значительно удобнее ровной или сильно вдавленной.

Высота обычного сиденья не должна превышать высоты колена, а спинка кресла подпирает спину на уровне 2–5-го позвонков.

На средствах транспорта, особенно предназначенных для движения в полевых условиях, сиденья следует хорошо прорессоривать для амортизации толчков. Сиденья для мобильной техники контролируются в соответствии с действующим стандартом.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ГОДОВОЙ ЭКОНОМИИ ЗА СЧЕТ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЧМ

1. Оценка годовой экономии за счет увеличения продолжительности фазы устойчивой работоспособности операторов СЧМ [19].

Под работоспособностью оператора СЧМ понимаются его потенциальные возможности качественно выполнять свои конкретные функции при заданных режимах работы (например, с заданной скоростью выполнения однотипных или разнотипных операций). Однако выявление потенциальных возможностей недостаточно для полного суждения о работоспособности оператора. Необходимо еще знать, как будут реализованы эти возможности в процессе работы. В связи с этим целесообразно выделить две группы показателей работоспособности [19]:

- характеризующие энергетическую и информационную обеспеченность рабочих действий оператора;
- характеризующие состояние активационных процессов, реализующих потенциальные возможности в ходе деятельности.

Для оценки энергетической обеспеченности наиболее распространены являются показатели состояния сердечно-сосудистой системы (частота пульса, величина артериального давления, ударный объем сердца, т.е. количество крови, поступающей в большой круг кровообращения при каждом сокращении сердца), дыхательной системы (частота дыхания, величина



легочной вентиляции в минуту, или минутный объем дыхания, изменение жизненной емкости легких, коэффициент использования кислорода), системы органов движения и некоторые мические характеристики, отражающие биоэнергетические особенности тканевого обмена. Все эти показатели могут быть использованы для оценки степени неспецифической напряженности деятельности оператора. Оценка специфических сторон деятельности оператора получается более показательной, если используются данные, которые характеризуют психофизиологические процессы, непосредственно связанные с переработкой информации.

Сведения о способе реализации потенциальных возможностей оператора (т.е. определение показателей, характеризующих состояние активационных процессов) могут быть получены с помощью следующих методов:

- тестирующих нагрузок (сравниваются показатели деятельности оператора до и после выполнения им дозированных стандартных нагрузок);
- интенсифицирующих нагрузок (на определенном этапе деятельности оператора изменяются условия его трудового процесса с целью увеличения его интенсивности);
- встроенных нагрузок (в обычный трудовой процесс оператора вводятся дополнительные операции, создающие ряд трудностей в его деятельности);
- длительных нагрузок (модификация первого метода).



Под фазой устойчивости работоспособности оператора СЧМ будем понимать такой промежуток времени, в течение которого оператор выполняет свои функции без нарушений заданных режимов работы. Очевидно, что фаза неустойчивой работоспособности оператора – это время, в течение которого оператор в ходе выполнения своих функций по тем или иным причинам (например, из-за усталости) допускает более или менее длительные или кратковременные отклонения от заданных режимов работы, что отрицательно сказывается на результатах его деятельности.

Следует различать понятия «работоспособность оператора» и «надежность работы оператора», хотя между ними имеется определенная связь. Надежность непосредственно связана с безошибочностью работы оператора. Работоспособное состояние оператора также предполагает его безошибочную деятельность, ибо отказ (ошибка, сбой) означает нарушение работоспособности. Однако неработоспособное состояние оператора или состояние пониженной работоспособности не обязательно сопровождается ошибками в его работе. Состояние оператора считается неработоспособным или пониженной работоспособности и в том случае, когда он, выполняя свои функции, не допускает ошибок, но работает не в заданных режимах (например, не с заданной интенсивностью вследствие усталости). Следовательно, количественная оценка работоспособности и надежности работы оператора должна осуществляться с помощью различных показателей.

Длительность фазы устойчивой работоспособности оператора определяется его функциональным состоянием, которое из-



меняется в процессе выполнения оператором своих функций. Эти изменения проходят несколько фаз, обозначаемых как фазы изменения работоспособности: мобилизации (предстартовая); вработываемости; компенсации, или устойчивой работоспособности, в течение которой эффективность труда оператора максимальна; утомления, когда показатели функционального состояния ухудшаются и эффективность труда понижается; срыва, когда происходит резкое падение работоспособности и невозможно продолжение работы.

В течение первой фазы, т.е. еще до начала работы, организм оператора мобилизуется, настраивается на выполнение заданных функций. Вторая фаза занимает начальный период работы, она отражает процесс мобилизации организма и повышения тонуса центральной нервной системы. Происходит приспособление оператора к наиболее экономному, оптимальному режиму выполнения заданной работы. Длительность и выраженность первых двух фаз определяются главным образом степенью тренированности человека к данной работе. У тренированных людей эти фазы очень непродолжительны. Фаза компенсации, или устойчивой работоспособности, является, как правило, наиболее длительной в рабочем цикле оператора. Основным фактором, вызывающим наступление фазы утомления, является интегральная экстенсивная напряженность деятельности (нагрузка). Кроме абсолютной величины нагрузки, на скорость развития утомления влияют характер нагрузки (статическая или динамическая, постоянная или ритмичная) интенсивность нагрузки (ее распределение

во времени), условия работы (микроклимат, режим труда и отдыха). Выраженность и время наступления утомления зависят от исходного функционального состояния оператора, его тренированности, физического развития и т.д.

В каждой конкретной СЧМ может быть разработан свой комплекс эргономических мероприятий, реализация которых будет способствовать увеличению продолжительности фазы устойчивой работоспособности операторов и более позднему наступлению фазы утомления вплоть до того, что эта фаза вообще может оказаться за пределами рабочего цикла.

С достаточной для экономических расчетов точностью можно утверждать, что за счет увеличения продолжительности фазы устойчивой работоспособности оператора (ΔT_{ϕ}), обусловленного внедрением соответствующих эргономических разработок, пропорционально растет его производительность труда, измеряемая количеством производственной продукции в течение определенного промежутка времени.

Для оценки годовой экономии за счет внедрения эргономических разработок, составляющих дополнительную СЭОРЭ и обуславливающих увеличение продолжительности фазы устойчивой работоспособности операторов СЧМ, рассмотрим наиболее распространенный режим работы операторов. На рис. (1.1) представлены графики режимов работы операторов до внедрения дополнительной СЭОРЭ (или для базовой СЧМ – рис 1.1а) и после ее внедрения (или для рассматриваемой СЧМ, в которой внедрена дополнительная СЭОРЭ, - рис. 1.1.б).

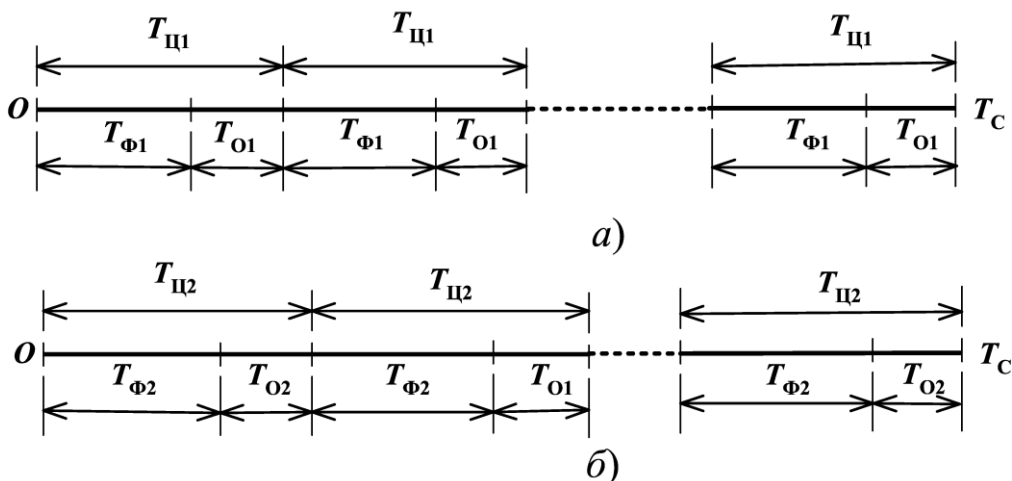


Рис. 1.1. Графики режимов работы оператора СЧМ: а – до внедрения дополнительной СЭОРЭ; б – после внедрения дополнительной СЭОРЭ.

Суточный фонд рабочего времени оператора составляет время одной смены T_c , которое принимается одинаковым для операторов базовой и рассматриваемой СЧМ. Рабочее время делится на циклы $T_{ц1}$ и $T_{ц2}$ соответственно для оператора базовой и рассматриваемой СЧМ, причем

$$T_{ц1} = T_{ф1} + T_{о1}; \quad (1.1)$$

$$T_{ц2} = T_{ф2} + T_{о2}; \quad (1.2)$$

$$T_{о1} = T_{о2} = T_o; \quad (1.3)$$

$$T_{ф2} = T_{ф1} + T_{ф}, \quad (1.4)$$

где $T_{ф1}$, $T_{ф2}$ – длительность фазы устойчивой работоспособности оператора соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ; $T_{о1}$, $T_{о2}$ – продолжительность отдыха оператора в каждом цикле его работы соответственно для базовой и рассматриваемой СЧМ



(во время отдыха восстанавливается работоспособность оператора настолько, что он может приступить к очередному циклу, работая в оптимальном режиме, характерном для фазы устойчивой работоспособности).

Операторы базовой и рассматриваемой СЧМ во время фазы устойчивой работоспособности работают с одинаковой результативностью (это обязательное условие, поскольку задача состоит в определении экономического эффекта только за счет увеличения этой фазы, другие источники экономии не рассматриваются). Однако производительность их труда R_1 и R_2 , измеряемая количеством производительной продукции (или числом выполненных операций) в течение одной смены T_c , будет различной.

Действительно:

$$R_1 = n_{оп} T_{ф1} m_{ц1}; \quad (1.5)$$

$$R_2 = n_{оп} T_{ф2} m_{ц2}, \quad (1.6)$$

где $n_{оп}$ – число операций (количество продукции), выполняемых оператором СЧМ во время фазы устойчивой работоспособности за определенный интервал (например, за 1 ч); $m_{ц1}$, $m_{ц2}$ – количество циклов работы в течение одной смены оператора соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ.

Так как

$$m_{ц1} = \frac{T_c}{T_{ф1} + T_o}; \quad (1.7)$$

$$m_{ц2} = \frac{T_c}{T_{ф2} + T_o}, \quad (1.8)$$



$$\text{то } R_1 = n_{\text{оп}} T_c \frac{T_{\phi 1}}{T_{\phi 1} + T_o} = n_{\text{оп}} T_c p_1, \quad (1.9)$$

$$R_2 = n_{\text{оп}} T_c \frac{T_{\phi 2}}{T_{\phi 2} + T_o} = n_{\text{оп}} T_c p_2, \quad (1.10)$$

где p_1, p_2 – удельный вес длительности фазы устойчивой работоспособности оператора соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ в общем фонде рабочего времени T_c .

Из формул (1.9) и (1.10) имеем

$$T_c = \frac{R_1}{n_{\text{оп}} p_1} = \frac{R_2}{n_{\text{оп}} p_2}.$$

Отсюда

$$R_1 n_{\text{оп}} p_2 = R_2 n_{\text{оп}} p_1 = (R_1 + \Delta R_{\phi}) n_{\text{оп}} p_1. \quad (1.11)$$

Из формулы (2.11) определяем прирост производительности труда оператора СЧМ за счет увеличения длительности фазы устойчивой работоспособности, обусловленного внедрением дополнительной СЭОРЭ:

$$\Delta R_{\phi} = R_1 \frac{p_2 - p_1}{p_1}, \quad (1.12)$$

или в процентах от R_1 :

$$\Delta R_{\phi} = \frac{p_2 - p_1}{p_1} 100. \quad (1.13)$$

В общем случае повышение производительности труда приводит к снижению себестоимости продукции и к увеличению объ-



ема ее выпуска. Снижение (в процентах) себестоимости единицы продукции определяется по формуле:

$$\Delta S_{\phi} = \left(1 - \frac{100 + \Delta \Phi}{100 + \Delta R_{\phi}}\right) y_{\text{зп}}. \quad (1.14)$$

Годовая экономия за счет снижения себестоимости продукции, обусловленного увеличением продолжительности фазы устойчивой работоспособности оператора СЧМ, будет:

$$\Delta C_s = 0,01 \Delta S_{\phi} S_{1r}, \text{ оп } A_2. \quad (1.15)$$

2. Оценка годовой экономии за счет повышения качества СЧМ.

Качество СЧМ – это совокупность всех ее свойств, обуславливающих пригодность системы удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. Качество СЧМ складывается из качества технических средств системы (машины), качества работы человека-оператора и качества производственной среды, определяющей условия функционирования системы.

Оценка качества СЧМ осуществляется с помощью показателей качества, которые представляют собой количественные характеристики одного или нескольких свойств системы, составляющих ее качество, рассматриваемые применительно к определенным условиям ее создания или эксплуатации. Особый интерес представляют эргономические показатели качества СЧМ, которые являются количественной мерой одного или нескольких эргоно-



мических свойств системы, используемой для определения ее соответствия эргономическим требованиям.

Ввиду большого разнообразия СЧМ (по типам, назначению и выполненным функциям) для их оценки может использоваться множество различных эргономических показателей качества (ЭПК), как абсолютных, так и относительных. В настоящее время не существует единой методики и единых алгоритмов определения значений ЭПК, однако можно рекомендовать более или менее общий подход к оценке этих показателей, который будет приемлем для ряда типов СЧМ. Это даст возможность оценить экономическую эффективность эргономических разработок, обеспечивающих повышение качества СЧМ.

В основу предлагаемого подхода положены измерения фактического (реализуемого) уровня эффективности функционирования рассматриваемой СЧМ в процессе ее эксплуатации и сравнение его с уровнем эффективности функционирования базовой СЧМ.

Абсолютное значение обобщенного эргономического показателя качества рассматриваемой СЧМ F_k определяется по формуле

$$F_k = w_2^c - w_1^c, \quad (1.16)$$

Где w_1^c – эффективность функционирования базовой СЧМ (или рассматриваемой СЧМ до внедрения дополнительных эргономических разработок, обеспечивающих повышение ее качества); w_2^c – фактическая (реализуемая) эффективность функционирования рассматриваемой СЧМ после внедрения дополнительных



эргономических разработок, составляющих дополнительную СЭОРЭ, направленную на повышение качества СЧМ.

Относительное значение эргономического показателя качества рассматриваемой СЧМ (в % от w_1^c) будет

$$F_k = \left(\frac{w_2^c}{w_1^c} - 1 \right) 100 \quad (1.17)$$

В сущности величина F_k представляет собой абсолютное или относительное приращение уровня эффективности функционирования рассматриваемой СЧМ по сравнению с базовой, получаемое за счет повышения качества системы, обусловленного внедрением соответствующих эргономических разработок.

Эффективность функционирования СЧМ может оцениваться различными показателями в зависимости от ее типа и назначения. Широко распространенными являются показатели, связанные с количеством выпускаемой продукции. Под продукцией понимается как продукты производства, имеющие непосредственное стоимостное выражение, так и результаты различного рода выполняемых операций, для стоимостного выражения которых необходимо определять стоимость операций. В дальнейшем при оценке экономической эффективности эргономических разработок (составляющих дополнительную СЭОРЭ или подсистему уже существующей СЭОРЭ), направленных на повышение качества СЧМ, будем считать, что их внедрение обеспечивает приращение производительности труда операторов системы и как следствие – приращение уровня эффективности функционирования СЧМ, что



отражается на приросте объема выпускаемой продукции и снижении ее себестоимости.

Внедрение эргономических разработок, повышающих качество СЧМ, способствует уменьшению отказов системы (в частности, уменьшению числа ошибок в работе операторов), т.е. повышению ее надежности. Поэтому, чтобы дважды не учитывать одну и ту же экономию, надежность базовой и рассматриваемой систем принимается одинаковой. Это замечание касается не только надежности системы. В такой же мере оно относится и к другим факторам, таким, как сокращение непроизводительных затрат рабочего времени операторов, снижение трудоемкости выпускаемой продукции, увеличение продолжительности фазы устойчивой работоспособности операторов и др. Все это самостоятельные источники экономии, которые могут создаваться при внедрении эргономических разработок, направленных на повышение качества СЧМ. Экономия, получаемая по этим источникам, не должна фигурировать несколько раз (пусть даже в завуалированном виде) при расчете суммарной годовой экономии за счет СЭОРЭ.

Прирост производительности труда операторов ΔR_k за счет внедрения эргономических разработок, обеспечивающих повышение качества СЧМ, легко определяется через прирост объема выпускаемой продукции ΔA_k , полученный в течение фиксированного периода работы системы T за счет того же фактора.

Если $A_{r1} = N_6 R_1 T_r$;
 $A_{r2} = N_6 R_2 T_r$; $N_6 = N_p$,



то

$$T_{\Gamma} = \frac{A_{\Gamma 1}}{N_6 R_1} = \frac{A_{\Gamma 2}}{N_p R_2}; A_{\Gamma 1} R_2 = A_{\Gamma 2} R_1,$$

или

$$A_{\Gamma 1} (R_1 + \Delta R_k) = (A_{\Gamma 1} + \Delta A_k) R_1.$$

Отсюда

$$\Delta R_k = \frac{\Delta A_k}{A_{\Gamma 1}} R_1; \Delta R_k(\%) = \Delta A_k(\%), \quad (1.18, 1.19)$$

где $A_{\Gamma 1}, A_{\Gamma 2}$ – годовой объем выпускаемой продукции (в единицах продукции) соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ; R_1, R_2 – производительность труда операторов соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ; N_6, N_p – количество операторов соответственно базовой и рассматриваемой СЧМ; T_{Γ} – годовой фонд рабочего времени системы.

Снижение (в %) себестоимости единицы произведенной продукции, обусловленное повышением качества СЧМ за счет внедрения дополнительной СЭОРЭ, будет

$$\Delta S_K = \left(1 - \frac{100 + \Delta \Phi}{100 + \Delta R_K}\right) y_{\text{зн.}} \quad (1.20)$$

Затем определим годовую экономию за счет снижения себестоимости продукции:

$$\Delta C_s = 0,01 S_1 \Delta S_k A_{\Gamma 2} \quad (1.21)$$

и годовую экономию на текущих затратах за счет прироста объема продукции:



$$\Delta C_A = 0,01 \Delta A_k S_2 N_{пр} \quad (1.22)$$

где $S_2 = S_1 (1 - 0,01 \Delta S_k)$.

(1.23)

В формулах (1.20) – (1.23) величины $\Delta\Phi$, ΔR_k , $U_{зп}$ берутся в процентах, ΔS_k – снижение себестоимости за счет повышения качества.

Суммарная годовая экономия на текущих затратах, получаемая за счет повышения качества СЧМ, будет

$$\Delta C_k = \Delta C_s + \Delta C_A. \quad (1.24)$$

Годовой экономический эффект и показатели экономической эффективности определяются так же, и по другим ранее рассмотренным источникам экономии.

ПРИЛОЖЕНИЕ №2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА В МАШИНОСТРОЕНИИ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ [19]

1. Постановка задачи.

Исследование эффективности системы эргономического обеспечения разработки и эксплуатации СЧМ включает решение как прямой задачи (т.е. комплексную оценку эффективности, в том числе технико-экономической эффективности эргономического обеспечения СЧМ заданной структуры с известными параметрами при выполнении заданных функций в определенных условиях эксплуатации), так и обратной (т.е. оптимизацию СЭОРЭ). Глу-



бина и полнота исследования эффективности СЭОРЭ зависят от набора ее параметров. Здесь вступают в силу два противоречивых начала: чем больше этот набор, т.е. чем больше число параметров, влияющих на показатели эффективности W , участвует в исследовании, тем больше и полнота и глубина исследования и тем в большей мере полученные значения показателей W отражают степень соответствия системы своему назначению и ее технико-экономическую результативность, но тем сложнее само исследование и тем вероятнее ошибка при его выполнении. Кроме того, при очень большом числе параметров, чтобы все же получить результаты или несколько упростить решение, часто приходится идти на различного рода допущения и ограничения.

Таким образом, исследования эффективности эргономического обеспечения включает:

- выбор и обоснование показателей эффективности СЭОРЭ, в том числе общих и частных показателей технико-экономической эффективности;
- разработку (выбор) метода и алгоритмов, обеспечивающих определение конкретных значений этих показателей;
- выбор и разработку методов и алгоритмов решения задачи оптимизации СЭОРЭ.

На различных этапах разработки, создания и эксплуатации СЧМ решающее значение могут иметь те или иные аспекты общей задачи исследования эффективности СЭОРЭ.

На этапе *разработки системы* важную роль приобретает задача определения приемлемых значений параметров СЭОРЭ. Тех-



ническое и организационное обеспечение этих значений позволяет достичь требуемого уровня эффективности функционирования СЧМ в процессе выполнения заданных функций (или в процессе обслуживания заданных потоков требований) при облегченных режимах эксплуатации системы или более высокого уровня эффективности при заданных (не облегченных) режимах эксплуатации за счет выполнения большего объема работы (или за счет обслуживания потоков требований с большей интенсивностью).

На этапе *создания опытного образца* СЧМ задача исследования эффективности системы ее эргономического обеспечения может решаться главным образом для оценки целесообразности различных усовершенствований, изменений и дополнений к первоначальному проекту системы.

На этапе *ввода системы в эксплуатацию* главное значение приобретает оценка эффективности различных усовершенствований, связанных с незначительными изменениями состава и структуры СЧМ и ее СЭОРЭ.

Человеко-машинные системы относятся к категории динамических систем, поскольку их состояние изменяется во времени. В процессе функционирования любой СЧМ на ее входе поступают полезная информация (изменяющиеся во времени программы, указания руководителей, сигналы о состоянии окружающей среды или объектов управления) и помехи, которые образуют входной сигнал X . Выходной сигнал Y есть результат целенаправленной деятельности системы.

Связь входного и выходного сигналов формально осуществ-



ляется с помощью оператора системы $A(Y, X, t)$:

$$Y = A(Y, X, t) X. \quad (2.1)$$

Оператор представляет собой правило установления соответствия между элементами множества X и Y . Он охватывает все действия над входным сигналом X , в результате которых образуется выходной сигнал Y . Если входными сигналами являются директивы, инструкции, указания руководящих органов, то оператор характеризует действия системы, вызванные этими указаниями.

Функциональное совершенство человеко-машинной системы вместе с ее эргономическим обеспечением характеризуется эффективностью СЧМ, причем количественной мерой этого совершенства являются показатели эффективности. В задачах оптимизации эргономического обеспечения в качестве целевых и ограничивающих функций используются показатели эффективности, выбираемые из множества W . Процесс оптимизации СЭОРЭ основывается на сравнении реального выходного сигнала Y человеко-машинной системы с требуемым сигналом Y_T . Величина Y_T задается исходя из объективно существующих возможностей, при этом используется опыт эксплуатации систем, аналогичных по целевому назначению исследуемой системе. Если заданы характеристики входного сигнала X , то характеристики выходного сигнала Y полностью определяются оператором $A(Y, X, t)$. При заданных характеристиках требуемого выходного сигнала Y_T показатель эффективности системы W как мера близости Y и Y_T будет изменяться при изменении этого оператора. Следовательно, в заданных условиях эксплуатации системы и при заданных требованиях к ре-



зультатам ее функционирования управлять качеством системы и таким образом влиять на ее функционирования управлять качеством системы и таким образом влиять на ее выходной эффект путем изменения оператора $A(Y, X, t)$.

Из сказанного видно, что управлять качеством СЧМ при заданных условиях эксплуатации и требованиях к выходному сигналу можно путем изменения: во-первых, некоторой совокупности параметров СЧМ, в том числе параметров ее эргономического обеспечения; во-вторых, структуры системы и ее эргономического обеспечения; в-третьих, и параметров, и структуры.

Мы рассматриваем вопросы оптимизации системы эргономического обеспечения СЧМ, поэтому управление качеством СЧМ с целью приближения реального сигнала Y к требуемому Y_T (поскольку такое управление обеспечивает получение необходимого значения показателя эффективности как СЧМ, так и системы ее эргономического обеспечения) будет осуществляться путем изменения величин, характеризующих и определяющих только эргономическое обеспечение.

Систему эргономического обеспечения будем называть оптимальной, если она определяется такими параметрами и характеристиками, при которых достигается экстремальное значение показателя ее эффективности. Оптимальная СЭОРЭ по сравнению с неоптимальными обеспечивает минимальное отклонение Y от Y_T . Для того чтобы придать этим отклонениям свойство измеримости, используется функция потерь $L(Y, Y_T)$. При выборе функции потерь необходимо соблюдать условие: чем меньше средние поте-



ри, тем выше качество системы. Минимальное значение средних потерь называется критерием оптимальности.

В процессе оптимизации СЭОРЭ СЧМ учитывается ряд ограничений, являющихся следствием конструктивных, энергетических эксплуатационных и других особенностей СЧМ. Учитываются как реальные возможности самой системы, так и реальные возможности среды, в которой она функционирует. Ограничения описываются равенствами, неравенствами, логическими связями.

В общей постановке задачи оптимизация СЭОРЭ СЧМ может быть сформулирована следующим образом. На вход СЧМ действует сигнал X , представляющий собой полезную информацию и помехи, причем известны вероятностные характеристики помехи и сигналы X в целом. Известно назначение СЧМ и определены показатели целевой эффективности эргономического обеспечения из множества $W_{ц}$, а также показатели технико-экономической эффективности СЭОРЭ из множества $W_{т}$. Следовательно, известны характеристики требуемого выходного сигнала $Y_{т}$ СЧМ. Задан критерий оптимальности эргономического обеспечения. Сформулированы ограничения, обеспечивающие физическую осуществимость оптимальной СЭОРЭ. Необходимо определить оператор A_0 оптимальной СЭОРЭ, способный наилучшим в смысле заданного критерия оптимальности образом приблизить реальный выходной сигнал Y к требуемому $Y_{т}$.

В зависимости от характера управляющей матрицы S_c различают параметрическую оптимизацию системы, оптимизацию решений и смешанную оптимизацию [8]. Элементами управляю-



щей матрицы являются некоторые управляющие звенья. Физически такими элементами могут быть численные значения некоторых параметров или события. Изменение оператора $A(Y, X, t)$ сводится к изменению состояния управляющих звеньев матрицы S_C .

В задачах параметрической оптимизации, или оптимизации параметров системы, структура системы задается обязательно.

Свойства системы зависят от m параметров $S_i (i = \overline{1, m})$, составляющих управляющую матрицу:

$$S_{C1} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_m \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Решение задачи параметрической оптимизации сводятся к определению матрицы $S_{C1} = S_0$ таким образом, чтобы вероятность $P(\theta/S_0)$ наступления события θ была максимально возможной (где S_0 – управляющая матрица оптимальной системы; $P(\theta/S_0)$ – вероятность того, что при управляющей матрице S_0 наступает событие θ ; θ – событие, состоящее в том, что при данной конкретной реализации входного сигнала X реализация выходного сигнала Y удовлетворяет близости к Y_T и, кроме того, удовлетворяются все требования, предъявляемые к системе и оформленные в виде ограничений). Следовательно, элементы управляющей матри-



цы – это количественно оцениваемые параметры системы. Конечной целью решения задачи параметрической оптимизации является определение таких значений параметров системы, которые обеспечивают наилучшие в определенном смысле свойства системы.

В *задачах оптимизации решений* структура системы может быть не задана или задана частично, и тогда в процессе оптимизации осуществляется выбор оптимальной структуры. Свойства системы зависят от r сложных событий c_i ($i = \overline{1, r}$), составляющих матрицу

$$S_{C2} = \begin{vmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_r \end{vmatrix} \quad (2.3)$$

и отвечающих определенным требованиям. Решение таких задач также сводится к определению матрицы $S_{C2} = S_0$ таким образом, чтобы вероятность $P(\theta/S_0)$ наступления события θ была максимально возможной. По существу это задача на выбор оптимальных решений (принимаемых в управляющих звеньях матрицы S_{C2}) из заданного множества возможных решений, причем под решением понимается не процесс формирования ответа, а сам количественно не измеряемый ответ типа «влево», «вправо», «выше», «ниже» и т.п.



В задачах смешанной оптимизации структура оптимизируемой системы задана, а динамические свойства системы зависят от конечного числа параметров и конечного числа решений, т.е. управляющая матрица является блочной и имеет вид

$$S_C = \begin{pmatrix} S_{C1} \\ S_{C2} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

причем матрицы S_{C1} и S_{C2} представляются соответственно в виде матрицы (2.2) и (3.2). Решение этих задач также сводится к определению матрицы $S_C = S_C$ таким образом, чтобы вероятность $P(\theta/S_0)$ наступления события θ была максимально возможной. В результате такой оптимизации определяются и оптимальные параметры системы, и оптимальные решения.

Заметим, что из управляющей матрицы (2.4) можно получить как частный случай матрицу S_{C1} или матрицу S_{C2} , поэтому нередко вместо матриц трех видов используется матрица S_C .

В общем случае любая из трех указанных задач оптимизации может быть использована при оптимизации эргономического обеспечения. Выбор типа задачи будет определяться характером управляющей матрицы S_C и ее управляющих звеньев (элементов). Если элементами управляющей матрицы являются количественно оцениваемые параметры СЭОРЭ СЧМ, что определяется характером составляющих эту систему эргономических разработок, то естественно применение параметрической оптимизации. Если же СЭОРЭ составлена из эргономических разработок научно-методического и организационного характера, представляющих собой наборы событий и решений, не поддающихся количествен-



Инженерно-эргономические принципы проектирования систем «Человек-машина» и алгоритмы оценки экономии

венной оценке, то реализуется задача оптимизации решений, поскольку элементами управляющей матрицы являются события c_i ($i = \overline{1, r}$). Смешанная оптимизация применяется в случае, когда СЭОРЭ включает эргономические разработки, определяемые как количественно оцениваемыми параметрами, так и совокупностью событий и решений. В этом случае элементами управляющей матрицы будут параметры S_i и события c_i , определяющие эргономические разработки СЭОРЭ.

Так как чаще всего система эргономического обеспечения в целом и отдельные ее эргономические разработки определяются количественно оцениваемыми параметрами, то в дальнейшем будем рассматривать только параметрическую оптимизацию системы.

Задача параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ формулируется следующим образом. Задан критерий оптимизации, или целевая функция Q (в качестве которой используется один из показателей эффективности системы – W), заданы параметры, определяющие состав и структуру системы. Определены ограничивающие функции и ограничения для оптимизируемых параметров по верхнему или нижнему уровню (или по обоим уровням одновременно). Известны функции, выполняемые человеко-машинной системой, и условия ее эксплуатации. Известны алгоритмы определения целевой и ограничивающих функций. Необходимо из заданной или найденной области допустимых значений Γ_S определить такие значения параметров S_i , принадлежащих подмножеству L^* (причем $L^* \in L$, где L – множество параметров систе-



мы), при которых ее эффективность была бы не ниже требуемой.

В результате решения этой задачи определяется, таким образом, не строго экстремальное значение показателя эффективности СЭОРЭ, а такое его значение, которое отличается от заданного или допустимого на определенную величину.

К оптимизируемым параметрам системы предъявляются следующие требования:

- параметры должны быть количественно оцениваемыми;
- число параметров должно быть ограниченным;
- для оптимизации должны выбираться такие параметры, изменение которых в наибольшей степени влияет на значение выбранной целевой функции;
- параметры должны быть варьируемыми, следовательно, необходимо учитывать, на каком этапе разработки, внедрения и эксплуатации СЧМ проводится исследование ее эргономического обеспечения.

В зависимости от того, что выбирается в качестве целевой функции (критерия оптимизации), решается задача оптимального распределения ресурсов или минимизации ресурсов.

В первом случае в качестве функции выбирается один из показателей целевой эффективности СЭОРЭ, принадлежащий множеству $W_{ц}$. Роль ограничивающих функций выполняют показатели технико-экономической эффективности системы, выбираемые из множества $W_{т}$. Во втором случае целевая функция выбирается из множества $W_{т}$, а ограничивающие функции – из множе-



ства $W_{ц}$.

В любом варианте постановки задачи параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ процесс ее решения значительно упрощается при одном критерии, т.е. одной целевой функции. В сущности к этому необходимо стремиться: из множества эффективности СЭОРЭ в качестве целевой функции необходимо выбрать такой показатель, в формировании значения которого участвует большинство параметров, принадлежащих множеству L .

Если не удастся ограничиться одной целевой функцией, задача параметрической оптимизации решается в несколько шагов. Существует ряд методов решения этой задачи:

1. последовательная параметрическая оптимизация по каждому критерию. Метод применяется, когда критерии оптимизации расположены в порядке убывающей важности, т.е. между ними имеет место отношение предпочтения;
2. параметрическая оптимизация по основному критерию с ограничительными условиями для других критериев, которые по существу являются ограничивающими функциями. Метод применяется, когда основной критерий важнее других критериев;
3. параметрическая оптимизация с ограничительными условиями для всех критериев. Метод применяется, когда все критерии равноценны. В этом случае для всех критериев назначаются ограничения и отыскивается решение задачи. Возможно несколько решений, удовлетворяющих этим ограничениям, и все они будут допустимы. Из их числа выбирается наиболее приемле-



мое, что может быть установлено с учетом возможности и целесообразности физической реализации того или иного набора значений оптимизируемых параметров;

4. параметрическая оптимизация с использованием обобщенного критерия. Метод применяется, когда показатели эффективности системы примерно равноценны и из них формируется некоторая функция, которая и называется обобщенным показателем, выполняющим роль целевой функции в процессе оптимизации.

При решении задачи параметрической оптимизации более или менее сложных систем эргономического обеспечения число параметров, составляющих множество L и существенно влияющих на показатели эффективности W , может оказаться настолько большим, что практически невозможно разрешить задачу оптимизации всех этих параметров. Речь может идти лишь о нахождении приемлемых значений некоторой части параметров.

Увеличение числа оптимизируемых параметров может осуществляться либо за счет организации отдельной оптимизации подсистем СЭОРЭ (т.е. за счет субоптимизации системы), либо путем поэтапной организации процесса оптимизации [11]. Поэтапная организация процесса оптимизации может преследовать также еще одну цель – получение информации для определения требуемых или допустимых значений целевых и ограничивающих функций. Для этого выбранные этапы оптимизации должны обладать свойством информативной преемственности: значения оптимизируемых параметров, полученные на первом этапе, должны



использоваться для определения требуемых или допустимых значений целевых и ограничивающих функций на последующих этапах.

Поэтому организация процесса параметрической оптимизации сложной системы подробно рассматривается в [15] на примере оптимизации параметров специализированной вычислительной системы с централизованным функциональным контролем.

2. Алгоритмы параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения.

Решению задачи параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения предшествует выбор метода оптимизации. Выбор метода осуществляется после определения целевой и ограничивающих функций и алгоритмов расчета их конкретных значений, установления характера ограничений для оптимизируемых параметров и анализа структур и процессов функционирования СЧМ и ее подсистем, для которых проводится параметрическая оптимизация эргономического обеспечения. Характер изменения целевой и ограничивающих функций при изменении оптимизируемых параметров устанавливается в результате реализации моделирующих алгоритмов комплексной оценки эффективности СЭОРЭ СЧМ. Для этого определяются значения целевой функции при изменении одного из оптимизируемых параметров и фиксированных значений других параметров и строятся соответствующие графики.



В дальнейшем при рассмотрении алгоритмов и рабочей методики параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ будем ориентироваться на описанные выше примеры, иллюстрирующие задачи оптимизации эргономического обеспечения и его подсистем по критериям целевой и технико-экономической эффективности. Для этих примеров задача оптимизации параметров СЭОРЭ на всех ее этапах является выпуклого программирования.

Критериями качества того или иного метода решения задачи оптимизации, выбираемого из числа методов выпуклого программирования, могут быть:

- скорость перемещения изображающей точки в области допустимых (приемлемых) значений оптимизируемых параметров Γ_S ;
- точность определения экстремума целевой функции или (в наших примерах) приемлемого решения при фиксированном числе шагов (для шаговых методов поиска экстремума);
- надежность определения конца процесса оптимизации;
- трудоемкость вычисленных процессов, связанных с решением задачи оптимизации.

Любой из известных методов решения задачи выпуклого программирования по точности может оказаться пригодным для оптимизации параметров СЭОРЭ, так как отыскивается не экстремальное, а приемлемое решение. В области же приемлемых решений целевые функции, как правило, получают незначительные приращения при изменении параметров. Кроме того, при решении экономических задач для оптимизируемых параметров не имеет смысла получать приемлемые значения с высокой точностью.



В рассматриваемых задачах выпуклого программирования на каждом этапе число оптимизируемых параметров, а также число соответствующих ограничений сравнительно невелики. Для решения таких задач наиболее эффективными оказываются прямые градиенты методы и их модификации [18]. Суть их заключается в том, что экстремальное (или приемлемое) значение целевой функции определяется путем последовательных шагов из начальной точки, принадлежащей области Γ_S , по направлению градиента или (в некоторых случаях) по одному из направлений, имеющих максимально значение частной производной целевой функции. Прямые градиенты методы в данном случае удобны тем, что не требуются аналитические выражения для целевой Q и ограничивающих U функций. Достаточно лишь знать из значения, также значения первых частных производных этих функций по оптимизируемым параметрам на каждом очередном шаге движения к экстремуму. Вместо частных производных берутся приращения функции, отнесенные к приращению i -го оптимизируемого параметра Δs_i , т.е.

$$\frac{\partial Q}{\partial s_i} \approx \frac{Q(s_i^{\Pi}) - Q^{(k)}}{\Delta s_i}, \quad (2.5)$$

где s_i^{Π} – значение i -го параметра на очередном пробном шаге; $Q^{(k)}$ – значение целевой функции на k -м шаге оптимизации.

Значения приращений $Q(s_i^{\Pi}) - Q^{(k)}$ определяются



при реализации алгоритмов оценки эффективности эргономического обеспечения, включенные в состав алгоритма параметрической оптимизации системы.

Применительно к условиям рассматриваемых задач параметрической оптимизации перемещение изображающей точки в области Γ_S осуществляется в направлении градиента:

$$\text{grad } G = q \text{ grad } Q + v \text{ grad } U, \quad (2.6)$$

где q, v – коэффициенты, характеризующие изменение шага оптимизируемых параметров.

Движение в направлении функции G обеспечивает увеличение целевой функции Q с одновременным выходом на границу области Γ_S . Значения оптимизируемых параметров на очередном $(k + 1)$ -м шаге оптимизации вычисляются по формуле

$$s_i^{(k+1)} = s_i^k + h_{s_i}^{(k+1)} \left(q \frac{\partial Q}{\partial s_i} + \sum_{j=1}^{m_1} v_j \frac{\partial U_j}{\partial s_i} \right), \quad (2.7)$$

причем

$$q = \left[\sum_{i=1}^{m_2} \left(\frac{\partial Q}{\partial s_i} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}; \quad (2.8)$$

$$v_j = rz_j; \quad (2.9)$$

$$z_j = \left[\sum_{i=1}^{m_2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial s_i} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}; \quad (2.10)$$



$$r = \left[\sum_{i=1}^{m_2} \left(\sum_{j=1}^{m_1} z_j \frac{\partial U_j}{\partial s_i} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.11)$$

где m_1 – число ограничивающих функций; m_2 – число оптимизируемых параметров; $h_{s_i}^{(k+1)}$ – значение рабочего шага параметра s_i .

Процесс оптимизации заканчивается, если имеет место

$$\left| Q^{(k+1)} - Q^{(k)} \right| \leq \epsilon_1 \vee \left| U_j^{(k+1)} - U_{jD} \right| \geq \epsilon_{2j} \vee \left| Q^{(k+1)} - Q_3 \right| \leq \epsilon_3 \vee \left| s_i^{(k+1)} \right| \leq \epsilon_4^i, \quad (2.12)$$

где ϵ_1 – приращение целевой функции, которое еще имеет смысл принимать во внимание и, следовательно, продолжать оптимизацию; Q_3 – заданное (требуемое) значение целевой функции; ϵ_3 – допустимое отклонение целевой функции от ее заданного значения; U_{jD} – допустимое значение j -й ограничивающей функции ($j = \overline{1, m_1}$); ϵ_{2j} – допустимое отклонение j -й ограничивающей функции от величины U_{jD} ; ϵ_4^i – минимальное приращение i -го оптимизируемого параметра, имеющего практическое значение.

Если оптимизация заканчивается вследствие того, что

$$\left| Q^{(k+1)} - Q^{(k)} \right| \leq \epsilon_1 \vee \left| Q^{(k+1)} - Q_3 \right| \leq \epsilon_3 \vee \left| s_i^{(k+1)} \right| \leq \epsilon_4^i,$$

то в качестве приемлемых принимаются значения параметров, полученные на текущем $(k + 1)$ -м шаге оптимизации. Если же процесс оптимизации завершен из-за невыполнения условия

$$\left| U_j^{(k+1)} - U_{jД} \right| \leq \epsilon_{2j}, \quad j = \overline{1, m_1},$$

в качестве приемлемых принимаются те значения параметров, которые были получены на предыдущем, k -м шаге оптимизации.

Для решения задачи оптимизации необходимо знать границы области допустимых значений параметров, поскольку значения параметров, удовлетворяющие условию

$$\left| Q - Q_3 \right| \leq \epsilon_3, \quad (2.13)$$

находятся именно в этой области. Поэтому решению собственно задачи параметрической оптимизации СЭОРЭ на каждом ее этапе должно предшествовать решение задачи поиска границ области Γ_S .

Допустимые значения оптимизируемых параметров могут определяться не в результате решения задачи поиска границ области Γ_S , а на основании соображений практического характера. Например, максимальные и минимальные допустимые значения параметров могут устанавливаться исходя из возможностей, обусловленных уровнем развития промышленности. Ограничения могут устанавливаться также лимитом материальных ресурсов, отпущенных на разработку и создание СЭОРЭ СЧМ.

В общем виде задача поиска границ области Γ_S формулиру-



ется следующим образом: найти границы допустимых значений оптимизируемых параметров системы эргономического обеспечения (или ее подсистем), при которых целевая функция Q удовлетворяет условию (2.13). При этом известны функциональные и структурные характеристики СЧМ и ее СЭОРЭ. Известны условия функционирования СЧМ. Заданы параметры входящих потоков требований на обслуживание системой. Известен алгоритм определения целевой функции. Для оптимизируемых параметров определены ограничения по минимуму и максимуму, т.е.

$$S_{i \text{ мин}} \leq S_i \leq S_{i \text{ макс}}, \quad (2.14)$$

где $S_{i \text{ мин}}$, $S_{i \text{ макс}}$ – предельно возможные минимальное и максимальное значение параметра S_i , устанавливаемые по тем или иным соображениям.

Для определения границ области Γ_S может быть использован алгоритм, предложенный в [15]. В результате реализации алгоритма поиска границ области Γ_S определяются границы значения параметров (принадлежащие этой области), которые в алгоритме параметрической оптимизации СЭОРЭ используются в качестве допустимых значений $S_{i \text{ макс}}^D$ или $S_{i \text{ мин}}^D$.

Рассмотрим алгоритм поэтапной параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения для решения задачи оптимизации.

Рассмотрим алгоритм поэтапной параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения для решения задачи оптимизации.

Конкретизируем алгоритм оптимизации и условия завершения процесса оптимизации для каждого этапа.

Первый этап. Перемещение изображающей точки осуществляется в направлении градиента:

$$\text{grad } G_1 = q_1 \text{ grad } \Delta n_c(0, t) + v_1 \text{ grad } \mathcal{E}_\Gamma + v_2 \text{ grad } E_\vartheta, \quad (2.15)$$

Определение параметров на очередном шаге оптимизации осуществляется по формуле

$$s_i^{(k+1)} = s_i^{(k)} + h_{s_i}^{(k+1)} \left(q_1 \frac{\partial \Delta n_c(0, t)}{\partial s_i} + v_1 \frac{\partial \mathcal{E}_\Gamma}{\partial s_i} + v_2 \frac{\partial E_\vartheta}{\partial s_i} \right), \quad (2.16)$$

где

$$q_1 = \left[\left(\frac{\partial \Delta n_c(0, t)}{\partial (\Delta K_T)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta n_c(0, t)}{\partial (\Delta p)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta n_c(0, t)}{\partial (\Delta \alpha)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$v_1 = r_1 z_1, \quad v_2 = r_1 z_2,$$

где

$$z_1 = \left[\left(\frac{\partial \mathcal{E}_\Gamma}{\partial (\Delta K_T)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_\Gamma}{\partial (\Delta p)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_\Gamma}{\partial (\Delta \alpha)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

$$z_2 = \left[\left(\frac{\partial E_\vartheta}{\partial (\Delta K_T)} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_\vartheta}{\partial (\Delta p)} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_\vartheta}{\partial (\Delta \alpha)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$



$$r_1 = \left[\sum_{i=1}^{m_2} \left(z_1 \frac{\partial \mathcal{E}_\Gamma}{\partial s_i} + z_2 \frac{\partial E_\mathcal{E}}{\partial s_i} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} ;$$

$$s_i = \Delta K_T, \Delta p, \Delta \alpha.$$

Завершение первого этапа оптимизации параметров СЭОРЭ производится при выполнении одного из пяти условий:

а)
$$\left| \Delta n_c^{(k+1)}(0, t) - \Delta n_c^{(k)}(0, t) \right| \leq \epsilon_5 ;$$

б)
$$\left| \Delta n_{CT}^{(k+1)}(0, t) - \Delta n_{CT}^{(k)}(0, t) \right| \leq \epsilon_6 ;$$

в)
$$\left| \mathcal{E}_\Gamma^{(k+1)} - \mathcal{E}_\Gamma \right| \geq \epsilon_7 ;$$

г)
$$\left| E_\mathcal{E}^{(k+1)} - E_\mathcal{E} \right| \geq \epsilon_8 ;$$

д)
$$\Delta s_i^{(k+2)} \leq \epsilon_9^i ,$$

где ϵ_5 – приращение целевой функции $\Delta n_c(0, t)$, которое имеет смысл принимать во внимание и, следовательно, переходить к очередному шагу оптимизации; ϵ_6 – допустимое отклонение целевой функции $\Delta n_{CT}(0, t)$ от ее требуемого значения $\Delta n_{CT}(0, t)$; ϵ_7, ϵ_8 – допустимые отклонения ограничивающих функций \mathcal{E}_Γ и $E_\mathcal{E}$ от их заданных значений \mathcal{E}_Γ и $E_\mathcal{E}$; $\Delta K_T, \Delta p, \Delta \alpha$ – оптимизируемые параметры; $\Delta s_i^{(k+2)}$ – приращение i -го оптими-



зируемого параметра на $(k+2)$ -м шаге оптимизации (см. рис. 3.1);

ϵ_9^i – минимальное приращение i -го оптимизируемого параметра, имеющего практическое значение.

Второй этап. В соответствии с рассмотренной задачей поэтапной параметрической оптимизации СЭОРЭ по критерию целевой эффективности на втором этапе производится оптимизация параметров подсистем СЭОРЭ. Алгоритм оптимизации для каждой подсистемы один и тот же, отличия заключаются лишь в выборе целевых и ограничивающих функций и оптимизируемых параметров. Поэтому достаточно конкретизировать алгоритм оптимизации применительно к одной подсистеме СЭОРЭ. Присвоим этой подсистеме номер 1.

Направление перемещения изображающей точки

$$\text{grad } G_2 = q_2 \text{ grad } \Delta n_1(0, t) + v_3 \text{ grad } \mathcal{E}_{\Gamma 1} + v_4 \text{ grad } E_{\mathcal{E}1} \quad (2.17)$$

Определение параметров на очередном шаге оптимизации производится аналогично формуле (3.16), т.е.

$$s_i^{(k+1)} = s_i^{(k)} + h_{s_i}^{(k+1)} \left(q_2 \frac{\partial \mathbf{M}_1(0, t)}{\partial s_i} + v_3 \frac{\partial \mathcal{E}_{\Gamma 1}}{\partial s_i} + v_4 \frac{\partial E_{\mathcal{E}1}}{\partial s_i} \right) \quad (2.18)$$

где

$$q_2 = \left[\left(\frac{\partial \mathbf{M}_1(0, t)}{\partial(\Delta K_{T1})} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{M}_1(0, t)}{\partial(\Delta \alpha_1)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{M}_1(0, t)}{\partial(\Delta \lambda_1)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

;



$$v_3 = r_2 z_3, \quad v_4 = r_2 z_4$$

где

$$z_3 = \left[\left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\Gamma 1}}{\partial \Delta K_{T1}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\Gamma 1}}{\partial \Delta \alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\Gamma 1}}{\partial \Delta \lambda_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

$$z_4 = \left[\left(\frac{\partial E_{\mathcal{E}1}}{\partial \Delta K_{T1}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{\mathcal{E}1}}{\partial \Delta \alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{\mathcal{E}1}}{\partial \Delta \lambda_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

$$r_2 = \left[\sum_{i=1}^{m_2} \left(z_3 \frac{\partial \mathcal{E}_{\Gamma 1}}{\partial s_i} + z_4 \frac{\partial E_{\mathcal{E}1}}{\partial s_i} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

$$s_i = \Delta K_{T1}, \Delta \alpha_1, \Delta \lambda_1.$$

Завершение процесса оптимизации параметров первой под-системы СЭОРЭ осуществляется при выполнении одного из следующих пяти условий:

а) $\left| \Delta n_1^{(k+1)}(0, t) - \Delta n_1^{(k)}(0, t) \right| \leq \epsilon_{10};$

б) $\left| \Delta n_1^{(k+1)}(0, t) - \Delta n_{1T}(0, t) \right| \leq \epsilon_{11};$

в) $\left| \mathcal{E}_{\Gamma 1}^{(k+1)} - \mathcal{E}_{\Gamma 1}^3 \right| \geq \epsilon_{12}$

г) $\left| E_{\mathcal{E}1}^{(k+1)} - E_{\mathcal{E}1}^3 \right| \geq \epsilon_{13}$



$$д) \quad \Delta s_i^{(k+2)} \leq \epsilon_{14}^i,$$

где ϵ_{10} – приращение целевой функции $\Delta n_1(0, t)$, которое следует еще принимать во внимание и поэтому продолжать процесс оптимизации; ϵ_{11} – допустимое отклонение целевой функции $\Delta n_1(0, t)$ от ее требуемого значения $\Delta n_{1T}(0, t)$; ϵ_{12} , ϵ_{13} – допустимые отклонения ограничивающей функции $\mathcal{E}_{Г1}$ и $E_{Э1}$ от их заданных значений $\mathcal{E}_{Г1}^3$ и $E_{Э1}^3$; ΔK_{T1} , $\Delta \alpha_1$, $\Delta \lambda_1$ – оптимизируемые параметры; $\Delta s_i^{(k+2)}$ – приращение i -го оптимизируемого параметра на $(k+2)$ -м шаге оптимизации; ϵ_{14}^i – минимальное приращение i -го оптимизируемого параметра, имеющее практическое значение.

Структурная схема моделируемого алгоритма параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ приведена на рис. 2.1. Алгоритм представлен в обобщенном виде безотносительно к какому-либо конкретному этапу оптимизации.

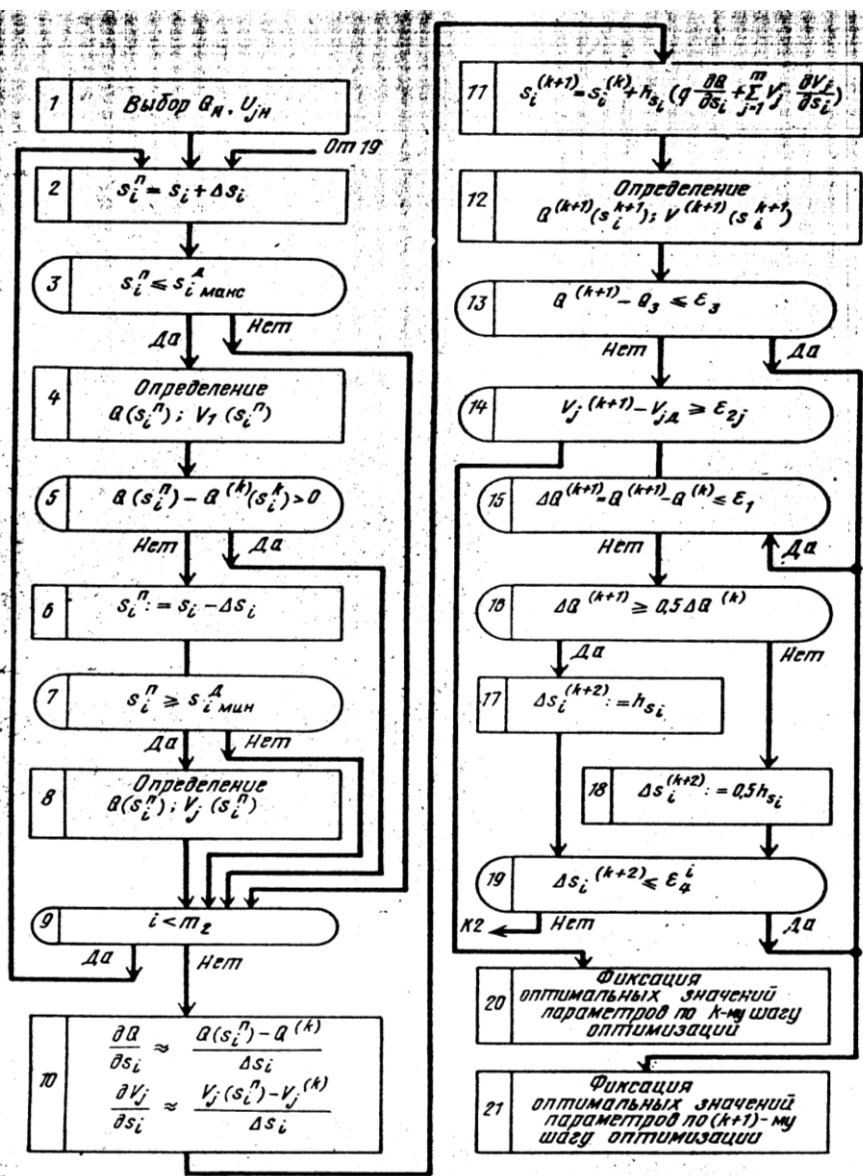


Рис. 2.1. Алгоритм параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения разработки и эксплуатации СЧМ.



В качестве начальных значений целевой Q_H и ограничивающих U_{jH} функций могут быть любые значения, соответствующие значениям параметров, принадлежащим области Γ_S . Группа операторов 2 – 9 проводит пробные шаги по оптимизируемым параметрам. При каждом изменении i -го параметра на Δs_i (с $i = \overline{1, m_2}$) осуществляется проверка выполнения условия

$$s_i^{\Pi} \leq s_{i \text{ макс}}^{\Pi}$$

или условия

$$s_i^{\Pi} \leq s_{i \text{ мин}}^{\Pi},$$

где $s_{i \text{ макс}}^{\Pi}$; $s_{i \text{ мин}}^{\Pi}$ – допустимые значения величин

$s_{i \text{ макс}}$, $s_{i \text{ мин}}$.

Проверка условия

$$Q(s_i^{\Pi}) - Q^{(k)}(s_i^{(k)}) > 0$$

необходима для установления направления изменения параметра s_i .

Операторы 16 – 19 обеспечивают формирование приращения $\Delta s_i^{(k+2)}$ для каждого параметра во время следующего, $(k+2)$ -го шага оптимизации.



3. Методика параметрической оптимизации системы эргономического обеспечения.

Методика оптимизации параметров СЭОРЭ СЧМ представляет собой совокупность функционально и логически связанных формализованных операций, при последовательном выполнении которых определяются оптимальные или приемлемые значения основных параметров эргономического обеспечения.

При рассмотрении методики необходимо иметь в виду следующее:

а) параметрическая оптимизация СЭОРЭ есть один из этапов ее синтеза;

б) параметрическая оптимизация системы – процесс более сложный по сравнению с комплексной оценкой ее эффективности. Более того, алгоритм оптимизации включает в свой состав алгоритм оценки эффективности системы. В моделирующем алгоритме оптимизации (рис. 2.1) алгоритм оценки эффективности СЭОРЭ (определение конкретных значений целевой и ограничивающих функций, выбираемых из числа показателей эффективности системы) представлен операторами 1, 4, 8, 12. В связи с этим методика ее параметрической оптимизации включает все те операции, которые определяют структуру общей методики комплексной оценки эффективности эргономического обеспечения СЧМ.

Рассмотрим последовательность и содержание операций, составляющих методику параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ.



1. Определение целей параметрической оптимизации. В зависимости от того, на каком этапе жизненного цикла СЧМ осуществляется оптимизация параметров ее системы эргономического обеспечения, цели этой оптимизации могут быть различными.

На начальном этапе проектирования СЧМ, когда производится ориентировочная оценка целесообразности реализации тех или иных эргономических разработок (с учетом характера разработок и масштабов их внедрения), достаточно знать приближенные значения параметров эргономического обеспечения. Поэтому предъявляются пониженные требования к точности решения задачи оптимизации, что накладывает свой отпечаток при формализации этой задачи (в частности установления ограничений, в том числе для пределов изменения оптимизируемых параметров СЭОРЭ) и выборе метода ее решения.

На завершающем этапе проектирования СЧМ и ее эргономического обеспечения, когда четко и подробно сформулированы соответствующие требования и определены необходимые приросты целевой и технико-экономической эффективности СЧМ за счет эргономического обеспечения, задача оптимизации его параметров решается с необходимой точностью. Это находит свое отражение в постановке задачи и выборе метода ее решения. Реализация решения задачи оптимизации, т.е. обеспечение оптимальных или приемлемых значений оптимизируемых параметров, может осуществляться с учетом возможности варьирования в достаточно широких пределах как набора эргономических разработок, составляющих СЭОРЭ, так и масштабов их внедрения.



На этапе создания опытного образца СЧМ, когда рассматривается вопрос о целесообразности различных измерений и дополнений к первоначальному проекту системы и ее эргономического обеспечения с целью повышения эргономичности (а следовательно, и эффективности) СЧМ за счет внедрения дополнительных эргономических разработок, задача оптимизации заключается в определении оптимальных или приемлемых значений параметров этих разработок.

Этап ввода СЧМ в эксплуатацию характеризуется тем, что различные усовершенствования системы и ее эргономического обеспечения, поскольку в них возникает необходимость, как правило, не должны быть связаны с существенными изменениями состава и структуры системы. Поэтому задача параметрической оптимизации СЭОРЭ или отдельных ее подсистем на этом этапе состоит в определении с заданной точностью оптимальных или приемлемых значений параметров системы (подсистемы) измененной структуры так, чтобы реализация результатов оптимизации не потребовала радикального изменения структуры системы.

2. Анализ СЧМ и ее эргономического обеспечения. Во время анализа выполняются операции, предусмотренные общей методикой комплексной оценки эффективности эргономического обеспечения. Это необходимо, так как алгоритм оценки эффективности СЭОРЭ является составной частью алгоритма ее параметрической оптимизации.

В ходе анализа выполняются следующие операции:

— определяется принадлежность анализируемой СЧМ к одному



из ее типов в зависимости от роли и места человека в системе и от степени влияния трудовой деятельности человека на эффективность функционирования СЧМ;

- выявляются источники экономии (прямой, имеющей непосредственное стоимостное выражение, и косвенной, т.е. источники прироста целевого эффекта, обусловленного внедрением СЭОРЭ), создаваемые за счет СЭОРЭ;
- определяется вид экономии по каждому источнику: за счет предотвращенного ущерба, за счет снижения себестоимости выпускаемой продукции («стоимости» операций, выполняемых системой), за счет дополнительного объема продукции;
- выбирается базовый вариант СЧМ;
- рассчитываются (априорно, поскольку речь идет о синтезе системы) затраты на создание и эксплуатацию СЭОРЭ;
- выбирается система показателей для оценки целевой и технико-экономической эффективности СЭОРЭ;

выбираются или разрабатываются алгоритмы и методики определения показателей целевой и технико-экономической эффективности СЭОРЭ.

3. Выбор целевой и ограничивающих функций. Выполнение этой операции определяются тем, какая именно задача оптимизации должна решаться – задача оптимального распределения ресурсов, когда в качестве целевой функции выбирается один из основных показателей целевой эффективности системы эргономического обеспечения, или задачи минимизации ресурсов, когда роль целевой функции выполняется один из показателей ее тех-



нико-экономической эффективности.

4. *Оценка зависимости выбранной целевой функции от параметров эргономического обеспечения.* Цель этой операции заключается в том, чтобы из общего числа параметров СЭОРЭ выбрать оптимизируемые, т.е. такие, которые в наибольшей степени оказывают влияние на целевую функцию и, кроме того, могут быть варьируемыми на данном этапе исследования СЧМ и ее эргономического обеспечения.

Выполнение этой операции осуществляется путем многократной реализации алгоритма комплексной оценки эффективности СЭОРЭ СЧМ, причем показателем эффективности является показатель, выбранный в качестве целевой функции в задаче оптимизации.

В результате устанавливается характер зависимости целевой функции от каждого параметра СЭОРЭ при фиксированных значениях других параметров:

$$Q = f_1(s_1)_{s_i} = const (i = 2, 3, \dots, m_2);$$

$$Q = f_2(s_2)_{s_i} = const (i = 1, 3, 4, \dots, m_2);$$

(2.19)

.....

$$Q = f_{m_2}(s_{m_2})_{s_i} = const (i = 1, 2, \dots, m_2 - 1)$$

5. *Определение структуры процесса параметрической оптимизации.* Структура процесса зависит от количества оптимизируемых параметров, установленных в результате выполнения предыдущей операции. Если число оптимизируемых параметров





невелико, задача оптимизации формулируется как одноэтапная. В противном случае необходимо ориентироваться на использование процесса поэтапной параметрической оптимизации.

Количество этапов зависит от числа оптимизируемых параметров и числа подсистем, на которые может быть разделена СЭОРЭ.

6. Выбор целевой и ограничивающих функций для каждого этапа параметрической оптимизации. После выбора этих функций на первом этапе оптимизации выбор их для каждого последующего этапа не вызывает затруднений. Например, если оптимизация осуществляется по критериям целевой функции предыдущего этапа.

7. Выбор оптимизируемых параметров для каждого этапа оптимизации. Это операции выполняются так же, как и операции 4 рассматриваемой методики, но применительно к подсистемам СЭОРЭ. Очевидно, что для установления зависимостей типа (2.19) необходимо знать алгоритмы определения целевых функций для каждой подсистемы СЭОРЭ.

8. Установление допустимых пределов изменения целевой и ограничивающих функций. В результате выполнения этой операции определяются допустимые диапазоны изменения целевых и ограничивающих функций на каждом этапе оптимизации:

$$Q_{3 \text{ мин}} \leq Q \leq Q_{3 \text{ макс}} ;$$

$$U_{j \text{ мин}}^D \leq U_j \leq U_{j \text{ макс}}^D ,$$

где $Q_{3 \text{ мин}}$, $Q_{3 \text{ макс}}$ – заданные (требуемые) минимальное и



максимальное значение целевой функции; $U_{j \min}^D, U_{j \max}^D$ – допустимые минимальное и максимальное значение j -й ограничивающей функции.

Установление пределов изменения этих функций существенно облегчается за счет информативной преемственности этапов оптимизации.

9. Определение ограничений для значений оптимизируемых параметров. С этой целью для каждого этапа оптимизации решается задача поиска границ области допустимых значений параметров Γ_s . В результате определяются допустимые значения

оптимизируемых параметров – максимальное $U_{i \max}^D$ и мини-

мальное $U_{i \min}^D$. Эти величины используются для установления допустимых отклонений оптимизируемых параметров от их заданных значений.

10. Формулировка задачи параметрической оптимизации для каждого этапа. При выполнении этой операции важно использовать все преимущества, предоставляемые поэтапной организацией процесса параметрической оптимизации СЭОРЭ, особенно в части информативной преемственности этапов.

11. Выбор метода оптимизации. Для каждого этапа выбирается один из методов параметрической оптимизации с таким расчетом, чтобы выбранные методы были идентичны по своим критериям качества.

12. Разработка алгоритмов оптимизации. Существо этой



операции заключается в адаптации выбранных методов оптимизации применительно к параметрической оптимизации СЭОРЭ и ее подсистем на каждом этапе.

13. Реализация алгоритмов оптимизации и анализ полученных результатов параметрической оптимизации на каждом этапе.

Разработка рекомендаций по реализации результатов параметрической оптимизации СЭОРЭ СЧМ. Основные рекомендации направлены на совершенствование состава и структуры системы эргономического обеспечения и ее подсистем, на корректировку масштаба внедрения отдельных эргономических разработок, с тем чтобы обеспечить получение оптимальных или приемлемых значений оптимизируемых параметров. Важно также разработать не один, а несколько возможных вариантов состава и структуры СЭОРЭ или ее подсистем, удовлетворяющих требованиям по обеспечению эргономичности СЧМ. Тогда у разработчиков СЧМ будет больше возможностей для выбора тех или иных организационных, технических и других решений.



ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов О.В. Оценка уровня биофизической совместимости в авиационных эргатических систем // Авиационная эргономика. – Киев. 1987 С. 32.
2. Аствацатуров А.Е. Инженерная эргономика машин. РГУ. – Ростов-на-Дону: 1987. – 144 с.
3. Аствацатуров А.Е. Основы инженерной эргономики. РГУ. – Ростов-на-Дону: 1991. С.18, С.60. – 208с.
4. Беллма Р. Процессы регулирования с адаптацией. Пер. с англ. – М.: 1964. – 202 с.
5. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: 1963. – 352 с.
6. Вудсон У., Коновер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и дизайнеров – конструкторов – М.: 1988. – 517 с.
7. Гладков Д.И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. – М.: 1984. С. 256.
8. Дилон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. Пер. с англ. – М.: 1984. – 318 с.
9. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. Пер. с польск. – М.: 1981. – 456 с.
10. Дроздов Е.А., Пятибратов А.П. Основы построения и функционирования вычислительных систем – М.: 1983. С.368.
11. Зефельд В.В., Мунимов В.М., Чернышева О.Н. Предпроектное эргономическое моделирование – М.: 1981 С.92.
12. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость ав-

томобиля – М.: 1971. – 416 с.

13. Мейстер Д. Эргономические основы разработки сложных систем. Пер. с англ. – М.: 1979. – 451с.

14. Мичулин В.В., Пятибратов А.П. Эффективность систем обработки информации. – М.: 1972. С. 280.

15. Морган К.Т., Чапанис А., Джесси С., и др. Инженерная психология в применении к проектированию производственного оборудования – М.: 1981 485 с.

16. Пашковский И.М. Устойчивость и управляемость самолета – М.: 1979. – 328 с.

17. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика – М.: 1980. С. 496.

18. Пятибратов А.П. Человеко-машинные системы: эффект эргономического обеспечения – М.: 1987. – 200 с.

19. Смирнов Б.А., Душков Б.А., Космолинский Ф.П. Инженерная психология. Экономические проблемы. – М.: 1983. – 224 с.

20. Смирнов Б.А., Душков Б.А. Космолинский Ф.П. Инженерная эргономика. – М.: 1988. – 224 с.

21. Энциклопедия кибернетики. Т.2 С.587, С529, С.252. – Киев: 1975.

22. Carter A.D.S. Mechanical Reliability, Wiley, London 1992.

23. Clark H.H., Clark E.V. Psychology and language. N.Y., 1977 225p.

24. Hagel E.W. Editor, Human Reliability Analysis, Nucl.

Safety. 17, 315-326 (1976).

25. Jelinski Y., Moranda P. Software Reliability Research. Yn: Statistical Computer Performance Evaluation, Ed. by Walter Freiberger, Academic, New York 1982.

26. Kececioглу D. Probalistic Design Methods for Reliability and their Data and Research Requirements, Failure Prevention and Reliability Conference Proceedings, ASME, New York 1977.

27. Meister D. Human Factors in Reliability Yn: Ed. by Yreson W. Handbook, New York 1966 [Имеется перевод Мейстер Д. Роль факторов инженерной психологии в обеспечении надежности. В кн.: Справочник по надежности – М.: 1969.]

28. Moranda P.L., Jelinski J. Final Report on Software Reliability Study Mc Donnell Douglas Astronautic Company, MDC Report №. 63921. Dec. 1972.

29. Moranda P.L., Jelinski J. Software Reliability Research Yn.: Statistical Computer Performance Evaluation, Ed. by Walter Freiberger, Academic, New York, 1972.

30. Shooman M.L. Software Reliability: Measurement and Models, Proceedings of the 1973 Annual Reliability Symposium, YEEE, New York 1995.

31. Singh C., Billinton R. System Reliability Modelling and Evaluation, Hutchinson, London, 1977.

32. Sukert A.N. An Ynvestigation of Software Reliability Models, Proceedings of the 1977 Annual Reliability and Maintainability Symposium, YEEE, New York 1977.

33. Swain A.D. Development of a Human Error Rate Data



Bank, February 1977.

34. Wolverton R.W., Schick G.J. Assessment of Software Reliability, TRW Systems Group, Report №. TRW – SS – 72 – 04, Sept. 1972.