

ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИНДИКАЦИИ В СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ

Д.Н. Булгаков, Н.Н. Столяров

Для эргатических следящих систем представлены методы эргономической разработки и оценки эргономического качества перспективных типов систем отображения информации (СОИ) с совмещенной и аналоговой визуализацией траекторных параметров, основанные на объективных расчетно-аналитических оценках зрительной загрузки оператора по СОИ, эргономического качества отдельных элементов СОИ и компоновки СОИ.

For ergatic tracking system methods of ergonomical construction and ergonomical valuation for complex and analog indicators of trajectory parameters based on objective valuations of operator visual scanning load, ergonomical quality of indicators and their arrangement are introduced and discussed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Эргономика, эргатическая система, следящая система, система отображения информации, интегральная индикация параметров..

Следящей системой (СС) называется техническая или эргатическая система, воспроизводящая исполнительным механизмом движение задающего устройства или, в общем случае, некоторый отслеживаемый процесс [1]. В современной технике СС часто являются элементами сложных технических комплексов, предназначенных для управления процессами различной природы. Например, в терминах теории СС описывается работа системы «пилот – самолет – атмосфера» при заходе на посадку по приборам в режиме штурвального управления. В сложных эргатических системах связующими звеньями между оператором и исполнительными техническими устройствами являются система отображения информации (СОИ) и органы управления. СОИ предназначена для представления оператору необходимой для выполнения стоящих перед эргатической системой задач информации и информации о состоянии технической части эргатической системы. Поэтому эргономическое качество СОИ оказывает сильное влияние на эффективность и безопасность работы эргатической системы в целом.

Назовем траекторной составляющей СОИ эргатической СС ту часть СОИ, которая дает оператору СС визуальную информацию о значениях и о динамике тех параметров, которые определяют физическое или механическое положение СС в ее фазовом пространстве, - так называемых траекторных параметрах (ТП). В дальнейшем изложении для краткости термин «траекторная составляющая» (СОИ) будет опускаться.

Перспективным и проверенным практикой последнего десятилетия прошлого века направлением эргономического совершенствования СОИ СС является отказ от традиционного цифрового представления ТП на отдельных изобразительных элементах (ИЭ) типа «шкала-стрелка», используемого в электромеханических СОИ и в первом поколении электронных

СОИ, и наметившийся переход к совмещенной или комплексной аналоговой визуализации ряда ТП. Для краткости терминологии совмещенную цифровую или аналоговую визуализацию нескольких ТП одним ИЭ или одним фрагментом общего информационного поля СОИ будем называть интегральным траекторным параметром (ИТП). В данной статье предпринимается попытка установления общих принципов эргономической экспертизы СОИ СС с интегральными траекторными параметрами и разработки методов объективной оценки эргономического качества как отдельного ИТП, так и СОИ с ИТП в целом.

Потенциально заложенные в СОИ с ИТП эргономические достоинства определяются тем, что в традиционных СОИ с раздельной, преимущественно цифровой визуализацией ТП практически достигнуты пределы возможностей по всем основным составляющим эргономического качества СОИ: по информативности, по адекватности представления информации о динамике СС необходимым управляющим действиям оператора и по селективности или структурированности представления этой информации [2]. Этот вывод сделан на основе эргономической экспертизы пилотажно-навигационной части электромеханической СОИ тяжелого самолета по системе обобщенных числовых показателей эргономического качества СОИ [3].

Современное техническое оснащение СОИ на цветных дисплеях или жидких кристаллах и информационно-компьютерное обеспечение СОИ допускают широкое использование аналоговой визуализации пространственного положения СС и ее динамики, комплексную визуализацию ряда ТП одним ИЭ, при которых внедряемые формы визуализации способны более полно отражать специфику выполняемых СС задач. Удачное в эргономическом отношении аналоговое представление видеоинформации должно упрощать оператору выделение из информационного поля СОИ необходимой по конкретной ситуации информации и ее переработку: возникает возможность предъявления оператору информации в форме, приближающейся к оперативной образно-концептуальной модели основных задач, выполняемых СС, что может значительно снизить уровень психофизиологической загрузки оператора при его взаимодействии с СОИ. Определение эргономически грамотных путей реализации этих потенциальных преимуществ СОИ с ИТП требует анализа всех трех вышеперечисленных составляющих эргономического качества СОИ с ИТП, а также разработки системы объективных числовых показателей эргономического качества ИТП.

1. Изобразительный элемент (ИЭ) любого типа производит преобразование визуализируемых им параметров, значения которых – случайные величины. Согласно фундаментальному положению теории информации преобразование случайной величины не увеличивает количества содержащейся в ней информации, поэтому ИЭ принципиально не способен дать дополнительную информацию о динамике визуализируемых им ТП. Однако оператору СС необходима информация о близости значений траекторных параметров к предельно допустимым, о взаимосвязи динамики различных ТП и т.д. Эргономически обоснованная техническая реализация изобразительного элемента ИТП должна предоставлять оператору такую дополнительную информацию, как для повышения информативности СОИ, так и для повышения адекватности представления информации необходимым управляющим действиям оператора.

2. Основным эргономическим требованием к ИТП является его информативность, т.е. способность предоставлять оператору всю необходимую для выполняемой СС задачи информацию о динамике визуализируемых им ТП. Однако понятие информативности как отдельного ИТП, так и СОИ в целом эргономически противоречиво, так как не учитывает объективную ограниченность психофизиологических возможностей оператора по приему и переработке информации. Действительно, превышение информационным потоком приборной информации пропускной информационной способности оператора затрудняет оператору выделение из информационного поля СОИ действительно необходимой по ситуации информации, что приводит к ухудшению эргономического качества ИТП и СОИ в целом [2].

Одним из числовых показателей информативности ИТП и его ИЭ, в котором учтено отмеченное противоречие, является показатель $\lambda_{ИТП}$ относительной зрительной загрузки оператора по ИТП. Показатель $\lambda_{ИТП}$, аналитический вид которого будет представлен ниже, характеризует минимально необходимые для достижения заданного качества работы СС временные затраты оператора на взаимодействие с ИТП. Особенность оценки зрительной загрузки оператора по ИТП и его ИЭ состоит в том, что получаемые теоретически по оперативным частотам [1] «собранных» в ИТП траекторных параметров значения показателя $\lambda_{ИТП}$ и теоретически оптимальной вероятности $P_{ИТП}$ наблюдения ИТП оператором [4] характеризуют исключительно эргономическую совместимость ТП, визуализированных ИТП, в то время как эмпирическое значение показателя $\lambda_{ИТП}$ и эмпирическое значение вероятности наблюдения ИТП оператором отражают как эргономическую совместимость объединенных в ИТП траекторных параметров, так и эргономическое качество технической реализации изобразительного элемента ИТП.

Для минимизации зрительной загрузки оператора определяющим требованием к эргономической организации ИТП является следующее: при выполнении оператором СС задач, вызывающих предельно высокую загрузку оператора по приборной информации, ИТП не должен искусственно повышать долю каждого из представленных в нем ТП в общем распределении зрительного внимания оператора сверх оптимальной доли этого ТП. Например, в пилотажно-навигационной СОИ самолета с индикатором воздушных порывов, теоретически позволяющей пилоту вести контроль полетных параметров по их удвоенным информативным частотам [1], такое повышение возникает при визуализации на интегральном полетном параметре полетных параметров с большим разбросом в значениях их информативных частот. Действительно, включенные в интегральный полетный параметр полетные параметры с низкими информативными частотами будут избыточно часто контролироваться пилотом, так как минимально необходимая частота контроля пилотом интегрального полетного параметра совпадает с удвоенной максимальной из информативных частот визуализированных интегральным полетным параметром полетных параметров, а любое обращение пилота к интегральному полетному параметру неизбежно сопровождается снятием с интегрального параметра избыточной для выполнения пилотажной задачи информации о динамике полетных параметров с малыми информативными частотами. Следствием этого является искусственное повышение зрительной загрузки пилота по интегральному полетному параметру и по СОИ в целом по сравнению со зрительной загрузкой пилота по СОИ с отдельной визуализацией полетных параметров. Таким образом, необходимым условием для эргономической совместимости нескольких ТП в интегральном траекторном параметре является близость значений оперативных частот этих ТП.

3. Аналитический вид показателя относительной зрительной загрузки оператора СС по ИТП определяется формулой

$$\lambda_{ИТП} = T_{cp} \cdot f_{ИТП} + T_n \cdot f_{ИТП},$$

где: T_{cp} - средняя продолжительность снятия оператором информации с ИТП при его однократном обращении к ИТП; $f_{ИТП}$ - оперативная частота ИТП, равная удвоенной максимальной из оперативных частот визуализируемых на ИЭ ИТП траекторных параметров. Значение $f_{ИТП}$ равно минимально необходимой для обеспечения заданного качества работы СС частоте зрительных обращений оператора к ИТП. T_n - средняя продолжительность переноса взгляда оператора с одного элемента СОИ на другой, обычно $T_n = 0,1c$.

Значение $\lambda_{ИТП}$ равно доли времени, необходимой оператору для контроля объединенных в ИТП траекторных параметров при заданном качестве работы СС, в общей продолжи-

тельности анализируемого этапа работы СС и, таким образом, дает теоретическую оценку зрительной загрузки оператора по ИТП.

Теоретическую оценку минимально возможного значения T_{cp} можно получить следующим методом, который основан на расчете количества информации, необходимой оператору для стабилизации каждого ТП из ИТП в пределах его допустимых отклонений [1].

Пусть T - продолжительность этапа работы СС в секундах. Тогда $N_{ИТП} = T \cdot f_{ИТП}$ - минимально необходимое число зрительных обращений оператора к ИТП на этом этапе. Обозначим через $I_{ИТП}$ (бит) суммарное количество информации, необходимое оператору для обеспечения заданного качества управления всеми ТП, представленными ИТП. Величина $I_{ИТП} / N_{ИТП}$ (бит/обращение) характеризует среднее количество информации, которое необходимо снять с ИТП за одно зрительное обращение к ИТП. При максимальной скорости V_I (бит/с) переработки приборной видеоинформации зрительным каналом оператора (обычно предполагается, что V_I находится в пределах 4-5 бит/с) средняя продолжительность снятия оператором информации с ИТП при его однократном обращении к ИТП составит

$$T_{cp} = (I_{ИТП} / N_{ИТП}) / V_I = I_{ИТП} \cdot V_I / N_{ИТП} \text{ с/обращение.}$$

Полученное по данной оценке T_{cp} значение $\lambda_{ИТП}$ позволяет на начальных этапах эргономической разработки ИТП объективно установить, является ли использование данного типа ИТП допустимым по эргономическим требованиям, так как по значению $\lambda_{ИТП}$ рассчитывается показатель λ относительной зрительной загрузки оператора по СОИ с ИТП [2], [5] и объективно выясняется, не приводит ли использование этого ИТП к недопустимому возрастанию зрительной загрузки оператора по СОИ.

4. При положительном решении вопроса об эргономической целесообразности использования данного ИТП после разработки технической формы его визуализации изобразительным элементом конкретного вида и компоновки СОИ с разработанным ИЭ ИТП на этапах макетных и натуральных испытаний объективная оценка эргономического качества СОИ с ИТП и ИЭ ИТП проводится по системе обобщенных числовых показателей, представленных в [3], [5].

Расчет показателя λ относительной зрительной загрузки оператора по СОИ СС ИТП выполняется стандартным методом из [3] в предположении, что ИЭ ИТП является отдельным прибором или узлом СОИ.

Для оценки СОИ с ИТП по траекторно-вероятностному показателю Q и структурному показателю QS [3], [5] определяется теоретически оптимальная вероятность $P_{ИТП}$ наблюдения оператором ИТП: $P_{ИТП} = \lambda_{ИТП} / \lambda$. Значение $P_{ИТП}$ характеризует теоретически оптимальную долю ИТП в общем распределении внимания оператора по элементам СОИ при его высокой зрительной загрузке по приборной информации. По установленному значению $P_{ИТП}$ находятся теоретически оптимальные вероятности переноса взгляда оператора по элементам СОИ и вероятности циклов в зрительном маршруте оператора по СОИ, используемые в структурном показателе QS .

Общая эргономическая оценка СОИ с ИТП по показателям Q и QS проводится методами, изложенными в [4], [5], в предположении, что ИЭ ИТП является отдельным прибором или узлом СОИ. Возникающие для СОИ с ИТП особенности в выборе используемых в расчете показателя Q эталонных дисперсий ТП, представленных на ИЭ ИТП, будут обсуждены в следующем пункте.

5. Объективная числовая оценка эргономического качества ИЭ ИТП, включающая оценку его информативности, дается значением траекторно-вероятностного показателя ИЭ

ИТП $Q_{ИТП}$. Для определения аналитического вида этого показателя предполагается, что ИЭ ИТП визуализирует K траекторных параметров; $P_{ИТП} = p$ - теоретически оптимальная вероятность наблюдения оператором ИТП; q - эмпирическая вероятность наблюдения оператором ИЭ ИТП, устанавливаемая при макетных или натуральных испытаниях СОИ с ИТП; D_j - теоретически достигаемая при теоретически оптимальной вероятности наблюдения оператором ИТП дисперсия j -го ТП (эталонная дисперсия j -го ТП); E_j - эмпирическая дисперсия j -го ТП, устанавливаемая при натуральных испытаниях СОИ с ИТП; $j = 1, \dots, K$. В принятых обозначениях

$$Q_{ИТП} = \frac{1}{2^{|p-q|}} \cdot \sqrt{\frac{K}{\sum_{j=1}^K \frac{E_j}{D_j}}} \quad (1)$$

Очевидно, что при $D_j \leq E_j$ для каждого $j = 1, \dots, K$ $0 < Q_{ИТП} \leq 1$, причем $Q_{ИТП} = 1$ тогда и только тогда, когда $p = q$ и $E_j = D_j$ при каждом j , то есть когда теоретически оптимальная и эмпирическая вероятности наблюдения оператором ИТП совпадают, а качество стабилизации каждого ТП, характеризуемое его эмпирической дисперсией, совпадает с эталонным.

В зависимости от технических особенностей ИЭ ИТП выбор значения эталонной дисперсии входящего в ИТП траекторного параметра производится одним из двух способов:

- если ИЭ предоставляет оператору возможность отдельного наблюдения j -го ТП по удвоенной оперативной частоте f_j этого ТП, то есть ИЭ не вынуждает оператора искусственно завышать частоту контроля j -го ТП до $f_{ИТП}$, то D_j полагается равной суммарной дисперсии частотных составляющих этого ТП в диапазоне $(f_j, +\infty)$, не подавляемых стабилизирующим управлением этим ТП;
- если некоторый из ТП, входящих в ИТП, может наблюдаться оператором только с частотой наблюдения оператором всего ИЭ ИТП, минимально допустимое значение которой составляет $f_{ИТП} g$, то эталонная дисперсия D_j такого j -го ТП полагается равной суммарной дисперсии частотных составляющих этого ТП в диапазоне $(0,5 f_{ИТП}, +\infty)$.

Анализ исходных для расчета $Q_{ИТП}$ величин - значений D_j и E_j каждого из входящих в ИТП траекторных параметров уже способен выделить неудачно визуализированный на ИЭ ИТП траекторный параметр – для такого ТП его эмпирическая дисперсия E_j значительно по сравнению с остальными ТП превышает свое эталонное значение D_j . В свою очередь, малое по сравнению с эталонным значением D_j эмпирическое значение дисперсии E_j показывает, что ИЭ ИТП искусственно завышает частоту контроля оператором j -го ТП и провоцирует оператора на избыточно высокочастотное управление этим ТП. Такой эргономический недостаток ИЭ ИТП искусственно повышает зрительную нагрузку оператора, что вследствие возникающего у оператора дефицита времени может привести к недопустимому ослаблению оператором контроля других ТП, не вошедших в ИТП. Само же значение траекторно-вероятностного показателя ИЭ ИТП, рассчитанное по формуле (1), дает интегральную эргономическую оценку ИЭ ИТП как по качеству управления ТП, вошедшими в ИТП, так и по близости характеристик структуры зрительной деятельности оператора по СОИ с ИТП к теоретически оптимальным: чем выше эргономическое качество ИЭ ИТП, тем ближе значение $Q_{ИТП}$ к единице.

Таким образом, представленные методы позволяют на начальных этапах проектирования СОИ с ИТП эргономически обоснованно определять состав комплексируемых в ИТП параметров, а на этапах испытаний СОИ с ИТП получить объективные числовые оценки эргономического качества ИЭ ИТП и СОИ с ИТП в целом. Дальнейшее развитие этих методов требует в первую очередь исследования эксплуатируемых СОИ с ИТП для установления нормативных значений введенных обобщенных показателей эргономического качества СОИ с совмещенной или аналоговой индикацией траекторных параметров СС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Д.Н. Следящие системы с дискретным вводом информации. – Моделирование и анализ данных. – М.: МГППУ. 2011, № 1. С. 76-86.
2. Булгаков Д.Н. Математические методы эргономического проектирования СОИ самолета. – Техника. Информатика. Экономика. Сер. СОИ. – М.: ВИМИ. 1994. Вып. 1. С. 3-11.
3. Булгаков Д.Н., Столяров Н.Н. Объективные методы эргономической экспертизы СОИ самолета. – Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность. – М.: МГТУ ГА. 2003. № 59. С. 51-56.
4. Столяров Н.Н. Эргономическое проектирование СОИ самолета с совмещенной визуализацией полетных параметров. – Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность. – М.: МГТУ ГА. 2003. № 59. С. 95-100.
5. Булгаков Д.Н. Теоретические основы расчетно-экспериментальной оценки эргономического качества системы отображения информации в следящей системе. – Экспериментальная психология. – М.: Русавиа, МГППУ. 2013. № 1. С. 88-96.

Работа поступила 24.09.2016г.