

Приборные панели: методы оптимизации расположения органов управления

Д. В. Предтеченский
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
predtech4@yandex.ru

А. А. Волосюк
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
Университет ИТМО
aavolosiuk@gmail.com

А. А. Балканский
Университет ИТМО
aabalkanskii@itmo.ru

Аннотация. В ходе работы были рассмотрены существующие подходы к увеличению эргономического качества пользовательского интерфейса пульта управления путем нахождения более эффективной по сравнению с исходной организацией расположения органов управления с использованием линейного программирования. Была составлена целевая функция длительности доступа к органам управления в зависимости от частоты их использования, решена задача минимизации полученной целевой функции. Разработанная методика наряду с уже существующими была применена для оптимизации компоновки органов управления существующего физического интерфейса, а после был проведен сравнительный анализ эффективности применения каждой из методик.

Ключевые слова: пульта управления; органы управления; линейное программирование; эргономика; UX/UI

I. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Компоновка интерфейса оборудования может не полностью соответствовать характеристикам движения верхних конечностей оператора, требовать длительного выполнения повторяющихся операций и вызывать мышечную усталость. Это приводит к низкой эффективности работы и высокому количеству ошибок при выполнении операций, а также снижает эффективность и надежность взаимодействия человека с машиной, что особенно заметно при выполнении задач в стрессовой ситуации. Повышение уровня эргономичности интерфейса взаимодействия человека с компьютером является актуальной проблемой, которую необходимо решить.

Несмотря на то, что эта проблема существует очень давно, лишь в конце первой половины XX века появились первые работы, в которых люди попытались сформулировать и систематизировать принципы, которым должен следовать разработчик интерфейса при компоновке органов управления.

II. ЗАКОН ФИТТСА

Закон Фиттса – прогностическая модель движения человека, которая в основном используется при оценке эффективности взаимодействия человека с компьютером в эргономике. Этот научный закон предсказывает, что время, необходимое для быстрого перемещения к целевой области, является функцией соотношения между расстоянием до цели и ее размерами [1].

А. Исходная задача

В оригинальной статье 1954 года Пола Морриса Фиттса была предложена метрика для количественной оценки сложности задачи выбора цели. Метрика была основана на информационной аналогии, где амплитуда движения от одной цели до следующей (A) похожа на сигнал, а допустимое отклонение или ширина цели (W) похожа на шум (рис. 1). Показатель – это индекс сложности Фиттса (ID, в битах):

$$ID = \log_2 \left(\frac{2A}{W} \right). \quad (1)$$

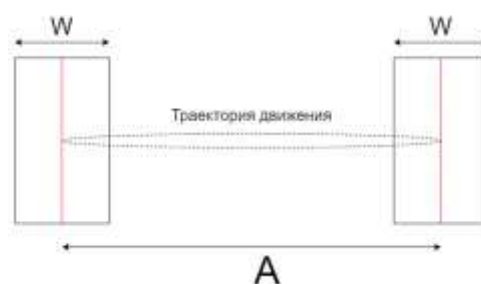


Рис. 1. Задача Фиттса из исходного эксперимента

Впоследствии из закона Фиттса исследователи вывели уравнение, которое выражает взаимосвязь между средним временем для завершения движения и параметрами задачи A и W:

$$MT = a + b * ID, \quad (2)$$

где:

MT – среднее время для завершения движения; a и b – константы, которые зависят от выбора устройства ввода и обычно определяются эмпирически с помощью регрессионного анализа; ID – показатель сложности достижения цели.

Несмотря на свои недостатки, такие как малое количество учитываемых параметров движения, эта форма модели обладает хорошей прогностической способностью по ряду двигательных задач.

В. Модель Шеннона

В 1989 году Скотт Маккинзи предложил свой способ увеличить точность предсказаний закона Фиттса, представленный в уравнении (3). Модель была названа так из-за ее сходства с теоремой Шеннона–Хартли.

$$ID = \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right). \quad (3)$$

Была доказана более высокая точность предсказания времени движения от исходного положения руки оператора до органа управления, чем у закона Фиттса в исходной формулировке [2].

С. Угловая формулировка

В случае, если начальное положение манипулятора не закреплено на поверхности пульта управления, в модель необходимо ввести дополнительную переменную D , которая будет отвечать за расстояние от начального положения манипулятора до пульта. Чем больше расстояние D , тем менее точна исходная формулировка закона Фиттса для подобной модели ввиду того, что оно в ней не учитывается. В таких условиях угловая амплитуда движения α и угловой размер цели ω могут быть более подходящими параметрами для точной модели, чем линейная амплитуда движения или линейная ширина целевого объекта на интерфейсе (рис. 2).

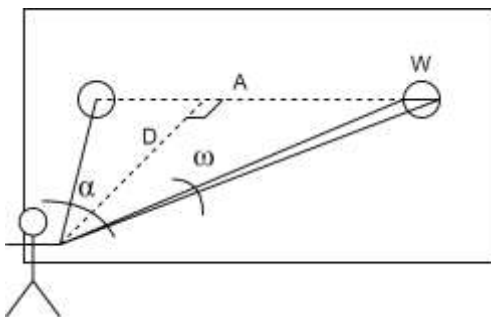


Рис. 2. Взаимосвязь между α и A и между ω и W

Если считать, что пользователь всегда находится по центру пульта управления, связь между α и ω определяются следующим образом:

$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{0.5A}{D} \right), \quad (4)$$

$$\omega = \arctan \left(\frac{0.5(A+W)}{D} \right) - \arctan \left(\frac{0.5(A-W)}{D} \right).$$

В этой системе предлагается видеоизмененная модель индекса сложности закона Фиттса [3]:

$$ID_{ANGULAR} = \log_2 \left(\frac{\alpha}{\omega^k} + 1 \right), \quad (5)$$

где k – показатель нелинейной зависимости между α и ω , отвечающий за вес параметра ω относительно α , и изменяющийся в зависимости от расстояния от оператора до цели, который можно получить эмпирически.

III. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДИК

Для оценки эффективности вариантов оптимизации в качестве объекта исследования был выбран синтезатор Roland MC-909 с размерами лицевой панели 491x386 мм (рис. 3).



Рис. 3. Лицевая панель синтезатора Roland MC-909

А. Методика Холмана

В своей работе Грэди Холман предложил использовать линейное программирование для минимизации времени доступа оператора к наиболее важным органам управления на пульте [4]. Он разбил пульт управления на j одинаковых прямоугольных панелей, измерил расстояние от оператора до середины каждой из них, а также вычислил труднодоступность каждой панели для среднестатистического оператора на основе измерения размеров европейского мужского тела 50-го процентиля (рис. 4).

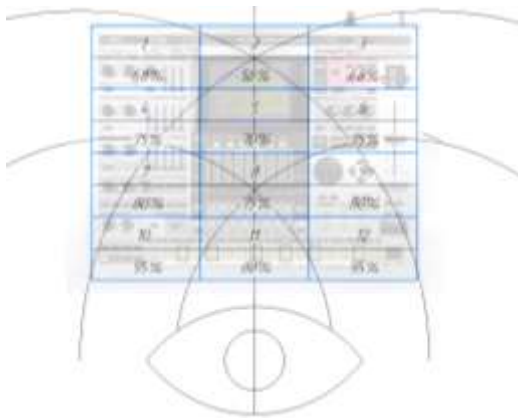


Рис. 4. Эффективность движения верхних конечностей оператора при достижении каждой конкретной панели разбиения интерфейса

Затем он предложил целевую функцию минимизации, выглядящую следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где n – количество панелей, на которое был разбит исходный пульт управления, X_{ij} – бинарная переменная, принимающая значение 1, если орган управления i расположен на панели j , и 0, если не расположен, C_{ij} – частота использования органа управления i , умноженная на переменную добавочного расстояния $\Delta\beta_j$ для панели j , а $\Delta\beta_j$, в свою очередь, определяется по формуле (7).

$$\Delta\beta_j = (100\% - E_j) * A_j, \quad (7)$$

где E_j – это эффективность использования панели j , а A_j – расстояние от оператора до панели j .

Результатом попарного перемножения значений частоты использования каждой функциональной группы и $\Delta\beta_j$ является таблица, содержащая значения добавочного расстояния, которое проходит рука оператора при достижении конкретной функциональной группы органов управления, расположенной на конкретной панели. Минимизация суммы добавочных расстояний дает оптимальное расположение органов управления по данной методике. Результат ее применения для оптимизации интерфейса синтезатора Roland MC-909 представлен на рис. 5.

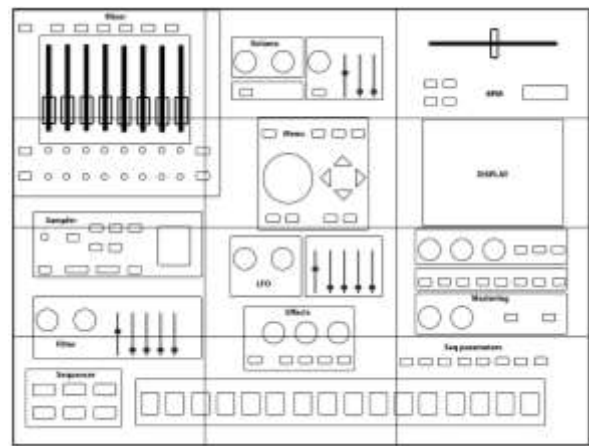


Рис. 5. Оптимизированный по методике Холмана интерфейс

В. Методика Юаня

В работе Шужи Юаня, аналогично работе Холмана, при математическом моделировании взаимодействия оператора с пультом управления панель разбивается на равные области, время доступа до всех органов управления в каждом из которых считается одинаковым [5]. Чтобы оптимизировать интерфейс, потерю времени при движении верхней конечности требуется свести к минимуму. Чтобы соблюсти данные условия был применен закон Фиттса в формулировке Шеннона, а также рекомендации по эргономической компоновке консоли, чтобы создать модель оптимизации компоновки пульта управления, целевая функция которой выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E_{ij} X_{ij} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$E_{ij} = f_i' MT_j = f_i' (a + b * ID_j) = f_i' \left(a + b \log_2 \left(\frac{A_j}{W_j} + 1 \right) \right), \quad (9)$$

где MT_j – действительное время движения позиционирования верхней конечности оператора от начального положения до панели j , ID_j индекс сложности достижения оператором панели j от начальной позиции, A_j и W_j – расстояние от начальной позиции верхней конечности до середины j , а также ширина панели j соответственно; X_{ij} – переменная решения, должен ли функциональный модуль i находиться на панели j .

После вычисления коэффициентов регрессии a и b производится вычисление среднего времени достижения панели, а затем, аналогично методике Холмана, произведения частоты использования групп органов управления и среднего времени достижения панелей заносятся в сводную таблицу, а затем минимизируется сумма времени достижения функциональных групп, находящихся на каждой из панелей. Результат применения методики представлен на рис. 6.

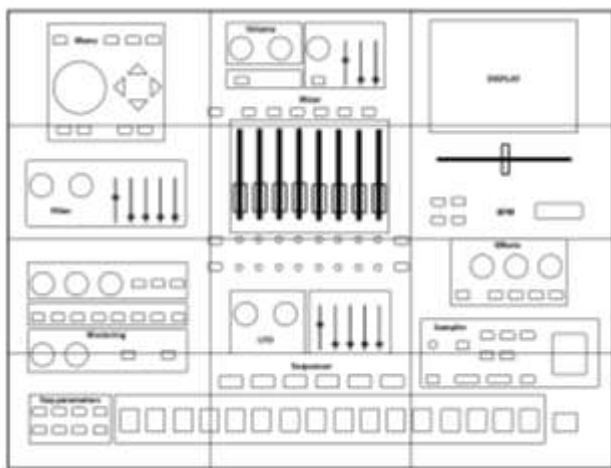


Рис. 6. Оптимизированный по методике Юоя интерфейс

IV. НОВАЯ МЕТОДИКА

Гипотеза, на основании которой построена новая математическая модель взаимодействия оператора с пультом управления, заключается в том, что расстояние от оператора до пульта достаточно велико, чтобы влиять на результат, полученный при минимизации функции времени достижения цели на пульте. Таким образом, если при моделировании подобного взаимодействия в функции минимизации время взаимодействия будет рассчитываться в угловой формулировке закона Фиттса, итоговое расположение органов управления на пульте будет более эффективным.

Предлагаемая методика определения расположения функциональных групп органов управления на пульте управления заключается в выполнении следующих шагов:

1. Выделить на пульте управления N близких по занимаемой площади функциональных групп органов управления.
2. Разбить пульт управления на N равных по площади панелей, на которых будут располагаться функциональные группы.
3. При помощи экспертов оценить частоту использования каждой из функциональных групп.
4. Измерить расстояние от оператора до центра каждой из панелей – A и ширину каждой панели относительно оператора – W .
5. Измерить антропометрические данные оператора – его рост, длину рук и длину нормали от плеча оператора до плоскости, в которой расположен интерфейс пульта управления – D .
6. Вычислить угловые коэффициенты α и ω для каждой панели.
7. Вычислить угловой индекс сложности достижения ID_A для каждой панели.
8. Произвести измерение среднего времени достижения каждой панели MT_j и провести регрессионный анализ модели $MT_j = a + bID_A$ –

вычислить коэффициенты регрессии a и b , используя метод наименьших квадратов

9. Занести данные о частоте использования каждой функциональной группы и о среднем времени доступа каждой из панелей в сводную таблицу, содержащую их произведения.
10. Решить задачу о назначениях, применив к таблице венгерский алгоритм, который выдаст оптимальное расположение каждого инструмента на интерфейсе по данному методу.
11. Создать модель новой компоновки элементов интерфейса (рис. 7) и произвести его экспертную оценку.

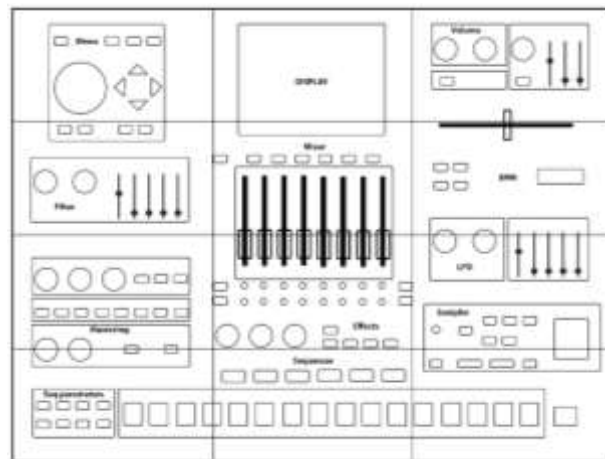


Рис. 7. Оптимизированный по новой методике интерфейс

V. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По выбранным при помощи каждого из методов соответствий инструментов и номеров позиций был составлен график времени при достижении каждой из панелей (рис. 8)

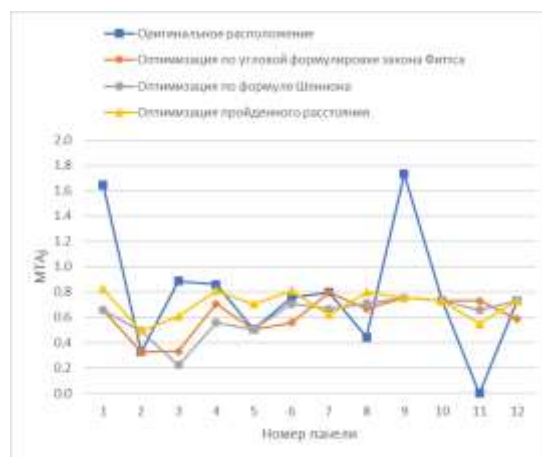


Рис. 8. График потери времени при достижении каждой из панелей

Данный график показывает, что применение каждого из методов сократило время достижения для большинства панелей. При использовании новой методики, основанной

на угловой формулировке закона Фиттса, время достижения сократилось в среднем на 33 %, в то время как другие методы показали также достаточно высокие результаты – 29 % для метода Юаня и 23 % для метода, основанного на минимизации добавочного расстояния.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы по созданию новой методики определения расположения функциональных групп органов управления на пульте управления было проведено исследование двух существующих методик и сравнение их с разработанной. Новая методика показала схожий уровень увеличения эффективности по сравнению с известными ранее.

Главным преимуществом представленной методики перед другими является ее универсальность. Ее эффективность при решении задач дальнего позиционирования была доказана Коппером в 2010 году [3]. Результаты представленного в данной работе

исследования показывают, что эта методика может быть использована для позиционирования органов управления на пульте управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Fitts P.M. The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement // *Journal of Experimental Psychology*. 1954. Vol. 47, № 6. P. 381–391.
- [2] MacKenzie S.I. Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction // *Human-Computer Interaction*. 1992. Vol. 7, № 1. P. 91–139.
- [3] Kopper R. et al. A human motor behavior model for distal pointing tasks // *International Journal of Human Computer Studies*. Elsevier, 2010. Vol. 68, № 10. P. 603–615.
- [4] Holman G.T., Camahan B., Bulfin R. Using Linear Programming to Optimize Control Panel Design from an Ergonomics Perspective // *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. 2003. Vol. 47, № 10. P. 1317–1321.
- [5] Yuan S. et al. The Layout Optimization Design of Command Control Cabin Display and Control Panel // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1060, № 1.