

В.Т. Белан, В.И. Корсун, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

Е.М. Снежко, канд.техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА МОСТОВОГО КРАНА

Постановка проблемы

Современное производство во многом зависит от эффективной работы оператора. Особенно это важно для автоматизированных систем управления крупных комплексов. Эффективность работы оператора определяется его психофизиологическими данными, информационной и физической нагрузкой. Построение математических моделей работоспособности оператора позволит прогнозировать его работу, более эффективно производить профессиональный отбор и обучение.

Анализ последних достижений

Основные результаты исследований и моделирования информационной нагрузки человека-оператора были получены для операторов энергокомплексов, в космической и авиационной отраслях [1, 2]. Для операторов прокатного производства такие исследования ранее не проводились. Методологической основой проведенного исследования явились методы статистического и имитационного моделирования [3, 4].

Постановка задачи

Целью работы было построение математической модели на базе экспериментальных исследований динамики изменения функционального состояния, работоспособности и напряженности операторской деятельности. Исследования проводились на разработанной экспериментальной установке

Основная часть

Методика исследования

В ходе экспериментов регистрировалась точность движения по маршруту. Кроме того, непрерывно регистрировались характеристики ЧСС, ЧД, КГР в цифровой форме. Эксперимент проводился по полной программе с каждым испытуемым, после чего проводилась математическая обработка данных. В качестве иллюстрации результаты одного эксперимента, выводимые на графопостроитель, приведены на рис.1.

На основе анализа зависимости психофизиологического состояния и качества деятельности оператора от режима и продолжительности труда, проведенного по результатам статистической обработки данных, и на основе анализа соответствующих графиков можно сделать следующие предположения о наличии связей между параметрами модели:

- изменение психофизиологических параметров оператора во времени зависит от информационной нагрузки оператора, скорости поступления инфор-

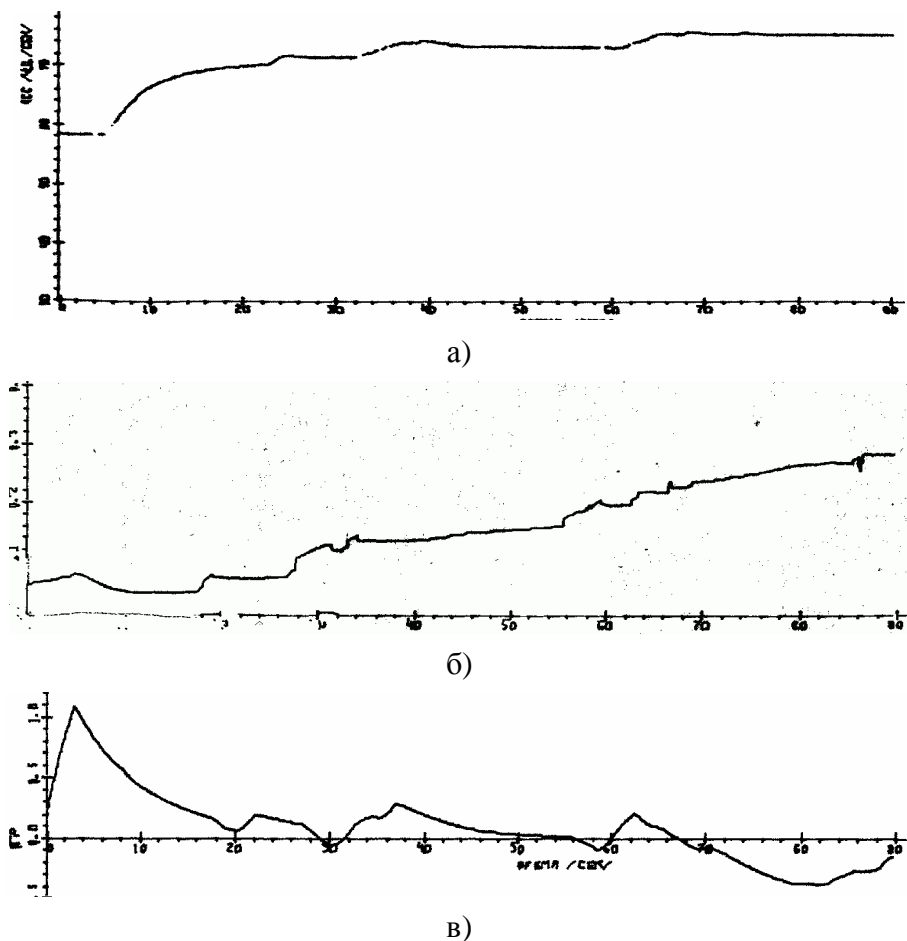


Рис.1. Графики экспериментальных зависимостей:

а) частота сердечных сокращений; б) частота дыхания; в) кожногальваническая реакция

мации, суммарной информационной нагрузки за прошедший период, а также от величины ошибки. т.е. от успеха его деятельности;

о результат деятельности оператора (вероятность ошибки) зависит от времени, значений ЧСС, ЧД, КГР, то есть психофизиологического состояния оператора и тех же параметров информационной нагрузки.

Эти предположения могут быть формализованы в виде следующих уравнений, связывающих модель информационной нагрузки оператора с моделью психофизиологического состояния:

$$dy_i/dt = f_i(V, IP, SIN, O), \quad i=1,2,3, \quad (1)$$

где V – скорость поступления информации; IP – информационная перегрузка; O – ошибка; SIN – суммарная информационная нагрузка; $y_1=ЧД$, $y_2=ЧСС$, $y_3=КГР$ – фоновые значения соответствующих показателей частоты дыхания, частоты сердечных сокращений (пульса) и кожно-гальванической реакции.

Основное уравнение, связывающее модели информационной нагрузки и психофизиологического состояния с моделью результатов деятельности имеет вид:

$$y_4 = f_4(y_1, y_2, y_3, V, IP, SIN), \quad (2)$$

где y_4 – вероятность ошибки (РО).

Для дальнейшей идентификации модели необходимо задать тип и вид модели, в зависимости от которых задается вид функций, а также определить связь между коэффициентами. В данном варианте мы ограничились выбором линейной детерминированной модели, то есть используем в уравнениях линейные функции первого порядка с постоянными коэффициентами. Тогда записанные ранее уравнения представляются в виде (используя метод Эйлера) решения дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} y_{i,k} &= a_{i,1}y_{i,k-1} + a_{i,2} V_{k-1} + a_{i,3} IP_{k-m} + a_{i,4} O_{k-n} + a_{i,5} SIN_{k-p} + a_{i,6}, & i=1,2,3; \\ y_{4,k} &= a_{4,1}y_{1,k-1} + a_{4,2}y_{2,k-1} + a_{4,3}y_{3,k-1} + a_{4,4} V_{k-q} + a_{4,5} IP_{k-r} + a_{4,6} SIN_{k-s} + a_{4,7}, \end{aligned} \quad (3)$$

где в общем случае задержки l, m, n, \dots являются различными.

Для определения связи между k, l, m, \dots были проведены специальные исследования исходных экспериментальных данных. Очевидно, что в общем случае $l \neq m < k$ и $p \neq r \neq q < k$, т. е. значения психофизиологических параметров зависят от параметров предшествующей информационной деятельности оператора и ошибки, но изменяются с некоторым запаздыванием по времени после изменения последних. Это запаздывание объясняется сложностью физиологических процессов, наличием нескольких контуров управления, уровнем исследуемой физиологической функции в организме.

Для определения такого временного сдвига был проведен анализ функции взаимной корреляции каждого физиологического параметра и вероятности ошибки с параметрами правых частей уравнений. Ближайшие к нулю максимумы для соответствующих функций взаимной корреляции были отмечены при следующих значениях временных сдвигов (значения усреднены по всем экспериментальным массивам, табл.1):

Таблица 1

Экспериментальные значения временных сдвигов

Показатель	Временной сдвиг для V, IP, SIN		Временной сдвиг lkz ошибки	
	с	Шагов дискретизации	с	Шагов дискретизации
ЧСС	5, 23	28	2, 99	16
ЧД	5, 98	32	4, 31	19
КГР	2,99	16	0,19	1

Кроме уточненной структуры уравнений, результаты взаимно-корреляционного анализа представляют самостоятельный интерес для анализа операторской деятельности. Эти данные подтверждают априорные представления о том, что функция КГР менее инерционна к внешним воздействиям, чем ЧСС и ЧД. Она примерно в 2 раза быстрее реагирует на изменение информационной нагрузки и практически мгновенно на совершенную ошибку. Более длительная реакция ЧСС и ЧД на совершенную ошибку отражает сложный характер управления этими функциями организма с участием нервного и гумораль-

ного механизма регуляции. Психофизиологическое состояние организма практически сразу отражается на результатах деятельности.

Таким образом, с учетом определенных временных сдвигов уравнения модели операторской деятельности машиниста крана окончательно запишутся в виде

$$y_{1,k} = a_{1,1}y_{1,k-1} + a_{1,2} V_{k-28} + a_{1,3} IP_{k-28} + a_{1,4} O_{k-16} + a_{1,5} SIN_{k-28} + a_{1,6}; \quad (4)$$

$$y_{2,k} = a_{2,1}y_{2,k-1} + a_{2,2} V_{k-28} + a_{2,3} IP_{k-32} + a_{2,4} O_{k-32} + a_{2,5} SIN_{k-32} + a_{2,6}; \quad (5)$$

$$y_{3,k} = a_{3,1}y_{3,k-1} + a_{3,2} V_{k-28} + a_{3,3} IP_{k-28} + a_{3,4} O_{k-1} + a_{3,5} SIN_{k-28} + a_{3,6}; \quad (6)$$

$$y_{1,k} = a_{4,1}y_{1,k-1} + a_{4,2}y_{2,k-1} + a_{4,3}y_{4,k-1} + a_{4,4} V_{k-28} + a_{4,5} IP_{k-28} + a_{4,6} SIN_{k-28} + a_{4,7}. \quad (7)$$

Задача идентификации параметров такой модели, т.е. определение параметров a , может быть решена методом регрессионного анализа.

Структура моделирующей программы

Комплекс программного обеспечения построения математической модели операторской деятельности разработан с целью определения по экспериментальным данным параметров модели, статистической и графической обработки экспериментальных данных, идентификации параметров модели и имитационного моделирования операторской деятельности. Комплекс программ содержит:

- программу расчета информационной емкости маршрута;
- программу первичной обработки данных о состоянии и результатах деятельности оператора;
- программу множественной линейной регрессии;
- программу построения графиков из файла данных.

Построение матрицы наблюдений для регрессионной модели проводится в соответствии с уравнениями (4) – (7). В файлы записываются данные для определения коэффициентов регрессии в соответствующих уравнениях для ЧСС, ЧД, КГР и вероятности ошибки. Перед записью в файл, значения независимых переменных правой части уравнений сдвигаются на соответствующее число шагов относительно индекса зависимой переменной уравнений. Необходимость формирования матрицы данных для проверки регрессии связана с тем, что для проведения имитационного моделирования необходимы начальные значения ЧСС, ЧД и КГР, два последних из которых не содержатся в исходных файлах наблюдений, а определяются в результате работы предыдущей части программы. Для расчета регрессии в условиях полного эксперимента необходимы также текущие значения параметров информационной нагрузки оператора, которые вычисляются в результате работы предшествующих процедур программы.

Программа множественной линейной регрессии состоит из основной программы и пяти подпрограмм.

Результаты моделирования

В табл.2 представлены результаты одного из расчетов коэффициентов регрессии для полной (без исключения каких-либо переменных) множественной регрессии, выполненной по всей совокупности данных. Всего выполнено 34 эксперимента. Номера переменных соответствуют их номерам в уравнениях (4) – (7). Имя соответствующего массива содержит символ, который соответствует зависимой переменной для данного уравнения: С – ЧСС, Д – ЧД, К – КГР, Р- вероятность ошибки.

Таблица 2

МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ МАССИВА REGC2.DAT						
НПЕР	СРЕДН.	СТ.ОТКЛ.	КОР.С У	РЕГРЕССИЯ	СТ.ОЦ.	T
1	81.98624	5.26263	0.90692	0.8923653	0.0155358	57.43921
2	1.58260	1.69463	0.09160	-0.029187?	0.0714095	-0.40874
3	0.24406	0.42979	0.11983	0.1065826	0.2939724	0.3625
4	0.71589	0.79354	0.11471	0.0833250	0.1054198	0.7904
5	92,41010	61.09993	0.30166	0.0026828	0.0015133	1.77274
ЗАВИСИМАЯ						
6	81.96746	5.23977				
ПЕРЕСЕЧЕНИЕ		МН. КОР.	СТ.ОЩ. ОЦЕНКИ			
8.51840		0.90769	2.20571			
АНАЛИЗ ДИСПЕРСИИ РЕГРЕССИИ						
ДИСПЕРСИЯ	СТЕП.СВОБ.	СУММА КВ.	СР. КВ. ОТКЛ.			
ОТН.К РЕГР.	5	18051.12695	3610.22534		742.05640	
ОТКЛ.ОТ РЕГР.		7933858.	07422		4.86516	
СУММА		798	21909		2011	

Анализ коэффициентов регрессии для ЧСС показывает, что значение ЧСС в каждый к-й момент времени сильно зависит от значения того же параметра в предыдущий момент времени ($d = 0, 9577$). Вторым по степени значимости является параметр SIN, причем коэффициент регрессии меньше 0, т. е. длительная работа в условиях информационной нагрузки уменьшает значение ЧСС. Затем по степени влияния идет зависимость от наличия ошибки слежения. Скорость поступления информации и информационная нагрузка практически не влияют на ЧСС. Регрессия трех последних параметров с ЧСС положительная, т. е. при увеличении ЧСС также увеличивается, однако незначительно.

Анализ уравнения регрессии для ЧД показывает, что значение ЧД в значительной степени определяется ее предыдущим значением ($d = 0.923$). Более существенное значение, чем параметр SIN, имеет для частоты дыхания наличие ошибки, для нее коэффициент регрессии положительный. Для параметров информационной нагрузки (V, IP, SIN) коэффициенты регрессии отрицательны, т. е. их рост приводит к уменьшению ЧД. Как видно из графиков функции для отдельных массивов, это происходит за счет увеличения времени задержек дыхания.

Функция КГР, как и рассмотренные выше другие физиологические функции, зависит от своего предыдущего значения. Следующее место по значимо-

сти занимает ошибка (коэффициент регрессии отрицательный), затем скорость поступления информации (для нее коэффициент регрессии положительный). Для параметра SIN и в этом случае коэффициент регрессии отрицательный.

Резюмируя результаты регрессионного анализа для уравнений модели психофизиологического состояния оператора, можно сделать вывод, что параметры, изменяясь достаточно медленно, в значительной степени зависят от своего предыдущего значения. На все физиологические параметры значимо влияет наличие ошибок (на КГР и ЧД в большей степени, на ЧСС в меньшей). Таким образом, эти параметры отражают восприятие и переживание человеком-оператором результатов своей деятельности. Длительная работа оператора в условиях информационной нагрузки снижает уровень физиологических параметров относительно фоновых значений пропорционально продолжительности работы.

Анализ коэффициентов регрессии уравнения для вероятности ошибки показывает, что наиболее значимо эта величина зависит от уровня ЧСС и IP, причем соответствующие коэффициенты больше нуля. Оказалось неожиданным, что скорость поступления информации входит в уравнение регрессии хоть и с малым, но отрицательным коэффициентом. Это свидетельствует о том, что сама величина средней скорости не влияет на результат деятельности, а влияет лишь значение информационной перегрузки, т. е. для оператора существенна разница между "допредельной" ниже уровня перегрузки и "запредельной" скоростью поступления информации. Вероятность ошибки растет при увеличении времени работы в условиях информационной нагрузки.

Анализ коэффициентов регрессии по совокупности массивов показал, что все параметры модели, как физиологические, так и вероятность ошибки, с большой степенью значимости зависят от величины SIN. Значения коэффициентов уравнений модели получены для средней нагрузки около 4000 бит. Вместе с тем известно, что для проведенных экспериментов характерен широкий спектр средних нагрузок от 100 при первой регистрации, 2000 во второй и до 4000 бит в последней регистрации. Это обстоятельство привело к решению определить коэффициенты регрессии для массивов, соответствующим отдельным регистрациям, отдельно. Такое объединение вполне обоснованно, так как в этих группах объединены массивы с близкими значениями физиологических параметров, отражающих состояние оператора в короткий момент времени, для них характерен одинаковый уровень подготовки оператора.

Регрессия для ЧСС, проведенная по указанным группам массивов, показала, что коэффициенты регрессии для всех групп примерно одинаковы. Вторым по значимости фактором для ЧСС является SIN, а значимость других параметров существенно меняется при переходе от одной группы массивов к другой. Если для ЧСС во время первой регистрации большее значение имела величина ошибки, потом скорость, а затем перегрузка (что неудивительно, так как средняя скорость в этой регистрации равна 1, 58 бит/с, что меньше предела 2 бит/с), то для ЧСС во время второй регистрации более существенны скорость, перегрузка, а затем ошибка (здесь средняя скорость уже немного больше 2 бит/с). В последней регистрации наличие перегрузки уменьшает значение ЧСС, тогда как изменение скорости сказывается на ЧСС незначительно.

Разработанная математическая модель операторской деятельности позволяет проводить моделирование состояния оператора и результатов его деятельности при двух различных способах организации его работы. Пример одного из экспериментов с моделью приведен в табл.3.

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ			
НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ:			
ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ МАРШРУТА:	50.00000		
ОЖИДАЕМАЯ СКОРОСТЬ:	1.18000		
ПАРАМЕТРЫ	НАЧ. ЗНАЧ.	КОН. ЗНАЧ.	СРЕДНЕЕ
ЧСС	71.000	78.239	77.538
ЧД	17.000	23.579	23.197
КГР	0.020	0.061	0.053
СКОРОСТЬ	1.180	1.734	1.713
S1N	100.000	185,208	142.165
ВЕР.ОШ.	0.000	0.319	0.312

Вначале рассмотрим результаты моделирования, полученные для таких условий операторской деятельности, когда в каждый момент времени могут регистрироваться (или вычисляться на основе регистрируемых параметров в режиме реального времени) скорость поступления информации и ошибка деятельности. Такие условия близки к условиям натурального эксперимента, однако использование модели позволяет существенно сократить процедуру регистрации психофизиологических параметров. На основе фоновых значений ЧСС, ЧД, и КГР, а также двух параметров деятельности: скорости поступления информации и текущей ошибки, модель может предсказывать значения параметров, отражающих физиологическое состояние оператора и ожидаемую вероятность ошибки. Регистрация физиологических параметров и ведение их в модель для дальнейшего моделирования может производиться раз в 5-10 минут, в зависимости от необходимой точности предсказания результатов деятельности.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для одинаковых экспериментальных массивов показывает хорошее соответствие результатов моделирования значениям, зарегистрированным в условиях реальной операторской деятельности. По средним значениям переменных соответствие почти полное, на графиках видно, что модель в целом хорошо отражает динамику изменения средних значений моделируемых величин: ЧСС, ЧД и вероятность ошибки, т. е. основных величин, предсказание которых явилось целью моделирования. В силу специфики модели (наличие временных сдвигов переменных) начальный участок графика не восстанавливается и значения переменной принимаются равными их исходным значениям. Пики на графике вероятности ошибки массивов первой группы вызваны большой значимостью для этой величины информационной перегрузки в условиях малой суммарной нагрузки. Как только возникает перегрузка, модель предсказывает рост вероятности ошибок. Модель операторской деятельности также хорошо различает работу в разных режимах: динамика изменений рассчитанной вероятности ошибки в целом полностью соответствует динамике экспериментальной величины.

Рассмотрим подробнее результаты моделирования и их соответствие экспериментальным данным для таких условий операторской деятельности, когда в начале эксперимента проводится однократное измерение основных психофизиологических показателей, известна суммарная информационная нагрузка оператора к началу эксперимента, время прохождения маршрута. Модель позволяет определить в таких условиях средние значения ЧСС, ЧД, КГР во время и в конце выполнения оператором поставленной задачи, а также предсказать, с какой вероятностью ошибки оператор выполнит эту работу.

Конечные значения ЧСС, ЧД и КГР в условиях неполного эксперимента, предсказанные моделью, практически такие же, как и в условиях полного эксперимента, а предсказанная вероятность ошибки несколько ниже, чем в условиях полного эксперимента, так как модель предсказывает ожидаемую вероятность ошибки без учета ее реализации в конкретных операторских ошибках, а также возникающей при этом перегрузке. Несмотря на то, что значения вероятности ошибок, предсказанные моделью, несколько ниже, чем зарегистрированные в эксперименте, в целом результаты моделирования в условиях неполного эксперимента хорошо отражают различия динамики исследуемых величин в различных режимах операторской деятельности.

Совершенно другие результаты наблюдаются для моделирования ситуации прохождения маршрута за 30 и 20 с. Эти серии объединяет то, что в них ожидаемая скорость поступления информации на грани или выше предельных значений, а средняя фактическая скорость в 2-3 раза превышает предел нормальной нагрузки. В этом случае повышение ЧСС в начале работы более значительно. ЧСС практически остается на уровне фоновых значений даже в конце исследуемого периода работы. Подъем ЧСС здесь поддерживается большими скоростями поступления информации из-за постоянной работы в условиях перегрузки. По этой причине возникают задержки дыхания, и средние значения ЧД практически не отличаются от фоновых значений. В этих сериях сильно возрастает КГР и вероятность ошибки. Она составляет приблизительно 0.5.

Таким образом, математическая модель позволила определить раздельное влияние на психофизиологические показатели состояния человека и результаты его деятельности двух факторов: продолжительности работы оператора в условиях информационной нагрузки и наличия или отсутствия информационной перегрузки по скорости поступления информации.

Заключение

Анализ результатов статистической и графической обработки экспериментальных данных натурального психофизиологического эксперимента на макете рабочего места оператора крана, а также результаты математического моделирования операторской деятельности позволили предложить следующие рекомендации по организации деятельности крановщика. Так как функциональное состояние оператора и результаты его деятельности во многом зависят от режима информационной нагрузки, не рекомендуется использовать в работе режимы с таким необходимым временем прохождения маршрута, когда ожидае-

мая скорость поступления информации близка или превышает 2 бит/с. При этом реальная скорость поступления информации из-за реальных ошибок будет значительно выше, и оператор будет работать в условиях информационной перегрузки, что приводит к ухудшению его состояния и увеличению вероятности ошибки. Вместе с тем увеличение времени, отведенного на прохождение маршрута, так что скорость поступления информации будет намного ниже предельной, не вызывает существенного улучшения результатов работы оператора. Оптимальной оказывается скорость поступления информации несколько больше 1 бит/с. При определении продолжительности работы оператора необходимо учитывать его загрузку в течение смены. При работе в условиях большой суммарной информационной нагрузки уменьшается уровень функционирования физиологических систем организма, что выражается прежде всего в снижении уровней ЧСС и КГР.

Список литературы

1. Фролов М.В. Контроль функционального состояния человека-оператора. – М.: Наука, 1987. – 196 с.
2. Рыжов Б.Н., Сальницкий В.П. Методика оценки уровня психической напряженности // Космическая биология и авиационная медицина. М.: Наука, 1983. – №5.
3. Афифи Л, Эйзел Е. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1992, – 202 с.
4. Pritzker A., Introduction to Simulation. and SLAM II . Wiley, New York, 1995.