УДК 62.506:51—76

Б. В. ДЗЮНДЗЮК, канд. техн. наук, *Т. И. СТЕПАНОВА*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕАКЦИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОРГАНИЗМА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА

В связи с увеличением выпуска РЭА возрастает необходимость в исследовании воздействия вредных факторов среды рабочего места работников радиоэлектронной промышленности на организм человека. Особенно много внимания уделяется воздействию электромагнитного излучения. Однако в этой области имеется немало нерешенных задач. Особенно сложной является проблема, связанная с воздействием на организм человека низких уровней ППЭ. По этому вопросу существует ряд противоречивых мнений.

Как указано в работе [1], «необходимо изучать длительное облучение низкой интенсивности в сочетании с воздействием таких факторов, как высокая температура и влажность окружающей среды». С другой стороны, в ряде источников (например, [2]) справедливо указывается на то, что облучение работающих с источниками излучения микроволн во многих случаях имеет прерывистый и неравномерный характер. Следовательно, встает вопрос об изучении воздействия электромагнитного излучения, существенно изменяющегося во времени.

Таким образом, приходим к необходимости описания динамической системы, входные воздействия для которой — изменяющиеся во времени характеристики окружающей среды (например, уровень ЭМИ, температура, влажность), а выходные — параметры, характеризующие физиологическое и психофизиологическое состояние человека, причем зависимость между этими функциями времени является динамической, стохастической, непрерывной и, вообще говоря, нелинейной.

Динамический характер модели вызван тем, что временные характеристики связи воздействия и реакции зависят от запаздывания, поражения и восстановления, ритмичности функционирования затронутых биологических систем и других факторов [3].

Стохастический характер изучаемой зависимости объясняется, с одной стороны, тем, что на состояние человека влияет ряд неучтенных факторов, связанных с его индивидуальностью и неконтролируемыми особенностями жизни. С другой стороны, имеется случайная погрешность при измерении входных и выходных параметров системы. Непрерывность их связи не нуждается в обосновании. Нелинейный характер зависимости приближенно можно считать линейным.

Это предположение основывается на следующих аргументах. Во-первых, линейные модели широко применяются при исследовании биологических систем, в частности воздействия на них вредных факторов окружающей среды (см., например, [4]). Во-вторых, для измерения ряда параметров окружающей среды характерна высокая погрешность; значения параметров существенно изменяются во времени и пространстве. Например, при измерении уровня электромагнитных излучений СВЧ-диапазона погрешности измерительных приборов достигают 30 %. В-третьих, индивидуальные реакции организма, особенно при низких уровнях воздействия, весьма вариабельны. Таким образом, на наш взгляд, погрешность вследствие линеаризации модели должна быть существенно меньше суммарной измерительной погрешности.

Отметим еще одну особенность модели, которую мы строим. Эта модель является имитационной в том смысле, что главная задача при ее построении — не раскрытие механизмов воздействия факторов окружающей среды, а феноменологический прогноз эффекта вредного воздействия с целью выработки мер по его снижению.

Пусть Y — множество вектор-функций состояния организма человека-оператора; X — множество вектор-функций состояний внешней среды рабочего места оператора. Вектор-функции из Y имеют размерность m, а вектор-функции из X — размерность n.

Пусть $(x_1(t), ..., x_n(t))^T = x(t) \in X$, а $(y_1(t), ..., y_m(t))^T = y(t) \in Y$.

В этом случае можно принять математическую модель влияния на $x(t)$ в виде

$$y(t) = v(t) + \varepsilon_y(t), \qquad (1)$$

$$x(t) = u(t) + \varepsilon_x(t), \qquad (2)$$

$$v(t) = \int_0^t w(\tau)\, u(t - f)\, d\tau. \qquad (3)$$

Здесь $v(t)$ — детерминированная составляющая $y(t)$ (вектор-функция той же размерности); $\varepsilon_y(t)$ — стохастическая составляющая $y(t)$. Аналогично $u(t)$ и $\varepsilon_x(t)$ — соответственно детерминированная и стохастическая составляющие вектор-функции $x(t)$. Случайные функции $\varepsilon_y(t)$ и $\varepsilon_x(t)$ могут быть интерпретированы как ошибки измерения. Предполагается, что это — стационарные случайные процессы, некоррелированные между собой и с δ-видной автокорреляционной функцией, т. е. случайные процессы, близкие к белому шуму.

Взаимосвязь $x(t)$ и $y(t)$ выражается как связь их детерминированных компонент (3). Здесь $w(\tau)$ — импульсная переходная матрица-функция размера $m \times n$; T — продолжительность наблюдения.

Переходя в (3) к дискретному времени, получаем уравнение

$$v(t) = \sum_{i=1}^{N} w(\tau_i)\, u(t-\tau_i)\, \Delta\tau_i,$$

т. е. приходим к уравнению множественной регрессии с отстающими по времени (лаговыми) переменными.

Таким образом, первой проверкой адекватности нашей модели может служить анализ корреляции между временными рядами, образованными независимыми (входными) переменными с учетом отставания во времени и зависимыми (входными) переменными.

Основным методом решения задачи нахождения переходной функции (переходной матрицы) является составление уравнения Винера — Хопфа. В одномерном случае оно имеет вид

$$R_{xy} = \int_0^T w(\tau)\, R_{xx}(t-\tau)\, d\tau, \tag{4}$$

где

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)\, y(t+\tau)\, dt, \tag{5}$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)\, x(t+\tau)\, dt. \tag{6}$$

Как видим, функция R_{xy} является естественным обобщением корреляции временных рядов с запаздыванием.

Имеется ряд методов решения уравнения Винера — Хопфа (см. работу [5]). Эти методы основываются на дальнейшей параметризации задачи путем разложения $w(t)$ по заданной системе функций либо перехода к дискретному времени. Имеются также методы, основанные на применении преобразования Лапласа.

После определения функции w можно оценить параметры случайного процесса.

Если с достаточной степенью достоверности считать этот процесс стационарным и $M\varepsilon_y(0) = 0$, то оценивание можно признать адекватным.

Аналогичные рассмотрения можно провести и в многомерном случае: $w(\tau)$ — матрица-функция размера $m \times n$, R_{xx} — матрица-функция размера $n \times n$,

$$(R_{xx}(\tau))_{ij} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x_i(t)\, y_i(t+\tau)\, dt;$$

$R_{xy}(\tau)$ — матрица-функция размера $m \times n$,

$$(R_{xy}(\tau))_{ij} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x_i(t)\, y_j(t+\tau)\, dt.$$

Приведенные формулы для R_{xy} и R_{xx} пригодны при рассмотрении одной реализации случайных функций $x(t)$ и $y(t)$. При наличии реализаций, каждая из которых имеет длину T_i можно воспользоваться формулами

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{s} (T_i - \tau)} \sum_{i=1}^{s} \int_0^{T_i - \tau} x^{(i)}(t)\, y^{(i)}(t+\tau)\, dt;$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{s} (T_i - \tau)} \sum_{i=1}^{s} \int_0^{T_i - \tau} x^{(i)}(t)\, x^{(i)}(t+\tau)\, d\tau;$$

$$0 < \tau < \min T_i.$$

Здесь $x^{(i)}(t)$, $y^{(i)}(t)$ — i-е реализации процессов $x(t)$, $y(t)$.

Остановимся на некоторых практических вопросах определения переходной импульсной функции $w(\tau)$.

В формулах (5), (6) следует принять $\tau < T_R < T$. Интервал T_R нужно выбирать из следующих соображений: $R_{xy}(0)$ должно быть существенно больше $R_{xy}(T_R)$. Удобно проводить выбор T_R при центрированных данных, т. е. когда

$$\int_0^T x(\tau)\, d\tau = 0 \quad \text{и} \quad \int_0^T y(\tau)\, d\tau = 0.$$

В этом случае можно, например, определить T_R из соотношения $|R_{xy}(T_R)| < 0{,}05 \max\limits_{\tau < T_R} R_{xy}(\tau)$. Процедура выбора T_R часто носит не формальный, а эвристический характер. При выборе T_R слишком малым имеется опасность упустить существенную информацию, в то время как при выборе T_R, близким к T, вносим в уравнение неотфильтрованную случайную помеху (при τ, близком к T, величины

$$\frac{1}{T-\tau}\int_0^{T-\tau} x(t)\,x(\tau+t)\,dt \quad \text{и} \quad \frac{1}{T-\tau}\int_0^{T-\tau} x(t)\,y(\tau+t)\,dt$$

зависят от поведения функций $x(t)$, $y(t)$ на малых участках). Если $T_R < \tau < T$, следует принять $R_{xy}(\tau) = R_{xx}(\tau) = 0$.

В силу указанной выше низкой точности исходных данных от численных методов определения $w(\tau)$ требуется, в первую очередь, не высокая точность, а устойчивость к ошибкам.

Естественной с точки зрения задач охраны труда является следующая ситуация. Имеется технологический процесс, связанный с вредным воздействием, переменным во времени. Можно варьировать этими воздействиями в пределах определенных технологических ограничений. Нужно выбрать такой вариант процесса, чтобы он, удовлетворяя технологическим требованиям, приносил наименьший вред здоровью работников. Формализованно эта задача выглядит следующим образом. Имеется функционал $\Phi(y)$, определяющий вредность (тяжесть, опасность) состояния организма $y(t)$, и набор функционалов $\Psi_1(x)$, $\Psi_2(x)$, ..., $\Psi_r(x)$, характеризующих технологические требования. Приходим к задаче нахождения условного экстремума $\Phi(y(t))\to\min$ при $\Psi_i((x)(t))=0$ $(i=1, ..., r)$.

Вектор $x(t)$ можно изменять и по уровню (с помощью защитных средств), и по характеру изменения по времени (с помощью организации технологического процесса и труда персонала). Полученная математическая модель реакции организма на воздействие вредных факторов окружающей среды позволяет использовать оба эти фактора для оптимизации условий труда.

Список литературы: 1. *Гигиенические* критерии состояния окружающей среды для радиочастот и микроволн / Под ред. З. В. Гордон.— М.: Медицина, 1984.— 145 с. 2. *Гигиена* труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот / Под ред. З. В. Гордон — М.: Медицина, 1972.— 112 с. 3. *Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Антипов В. В.* Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений.— М.: Энергоиздат, 1984.— 175 с. 4. Методы математической биологии. Книга 7: Методы анализа и синтеза биологических систем управления.— К.: Вища шк. Головное изд-во. 1983.— 272 с. 5. *Растригин Л. А., Маджаров Н. Е.* Введение в идентификацию объектов управления.— М.: Энергия, 1977.—215 с.

Поступила в редколлегию 13.03.86