

УДК 510.62

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

ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Если рассмотреть задачу оптимизации эргатических систем, то в качестве критерия оптимизации чаще всего выбирается экономический или технико-экономический показатель (прибыль, производительность труда и т. п.), а гигиенические и эргономические требования порождают ограничения на переменные. Часто в качестве таких ограничений выступают гигиенические нормы. Рассмотрим подход к гигиеническому нормированию с точки зрения функционального состояния организма.

Анализ существующих гигиенических норм [1] показывает, что предметом нормирования является обычно уровень (ПДУ, ПДК), допустимый для параметра вредного производственного фактора в течение определенной части t заданного периода T . Чаще всего $t=8$, $T=24$ ч. Таким образом, определенные нормы для электромагнитного излучения с частотой 60—300 МГц, для характеристик микроклимата, производственного шума, промышленной пыли, промышленных ядов. Однако для некоторых других

факторов, наряду с указанными, применяются более точные подходы. Одним из таких подходов является дозовый, определяющий гигиенический предел $D = \int_0^T P(t) dt$, где $P(t)$ — уровень вредного фактора. Такой подход широко применяется для нормирования ионизирующих излучений [2] и получил в последнее время распространение на ЭМИ с частотой 0,3—300 ГГц при условии повышенной температуры воздуха ($t > 28^\circ\text{C}$).

На основании дозового подхода можно получить связь между уровнем вредного фактора и допустимой продолжительностью его воздействия. Эта зависимость, очевидно, имеет вид

$$P_{\max}(t) = \frac{D_{\max}}{t},$$

$P_{\max}(t)$ — максимально допустимое значение уровня вредного фактора, воздействующего в течение времени t , при этом ситуация может повторяться в течение следующего периода T ; D_{\max} — максимальная доза за период t .

В других случаях функция $P_{\max}(t)$ не определяется из дозовой нормы, а непосредственно табулируется. Так нормируются производственная вибрация, ультразвук, ЭМИ промышленной частоты.

Таким образом, в качестве результата нормирования можно рассматривать комплекс $(T, \{P_{\max}(t), t\})$. При этом составляющая $\{P_{\max}(t), t\}$ представляет собой множество, состоящее из одного (при нормировании ПДК, ПДУ), нескольких (при табличном нормировании уровня и времени) или континуума (при дозовом нормировании) элемента.

Естественным является желание получить более гибкие нормы, дающие оценку $P_{\max}(t)$ при континууме значений t . В качестве одного из подходов к выработке таких норм авторами предлагается метод, учитывающий динамику функционального состояния работника.

Под функциональным состоянием будем понимать комплекс параметров организма (вообще говоря, физиологических, психофизиологических и психологических), характеризующих его способность к выполнению возложенных на него функций. В ряде случаев удается характеризовать функциональное состояние одним параметром, либо выделив ведущий из группы параметров, либо комплексировав рассматриваемые параметры. В любом случае в пространстве функциональных состояний можно выделить области относительного комфорта, дискомфорта [3] и патологических состояний (рис. 1).

В качестве цели нормирования вредных производственных факторов можно поставить выбор такого ограничения на состояние среды, чтобы функциональное состояние оставалось (с заданной вероятностью) в пределах области комфорта или дискомфорта. Конкретные границы областей функционального состояния и допустимая вероятность выхода за эти границы определяются в за-

висимости от таких факторов, как конкретный характер деятельности, цели работы человека-оператора. Так, работа по спасению жизни других людей может проводиться с высоким напряжением сил организма, с повышенным риском патологического состояния. С другой стороны, при ответственной операторской деятельности даже незначительный дискомфорт функционального состояния может привести к аварии с тяжелыми последствиями.

Формализованно задачу нормирования можно поставить следующим образом. Пусть функциональное состояние организма

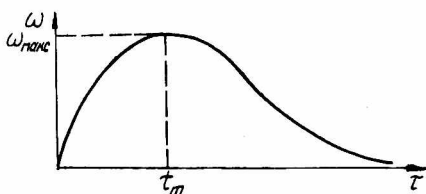
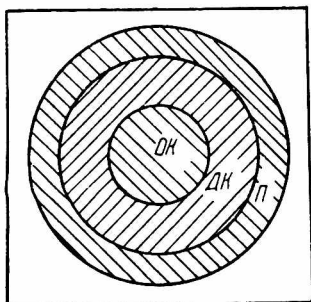


Рис. 1. Пространство функциональных состояний с областями относительного комфорта, дискомфорта и патологических состояний

Рис. 2. График зависимости импульсной переходной функции от времени

характеризуется вектором $y(t)$. Обозначим через Y класс значений вектора $y(t)$, соответствующий допустимому состоянию организма. Пусть $x(t)$ — вектор параметров вредных факторов окружающей среды. Вектор-функции $x(t)$, $y(t)$ целесообразно рассматривать как реализации случайных процессов. Тогда можно считать, что существует некоторый оператор A , ставящий в соответствие условиям труда состояние организма $y(t)$, т. е. $y = Ax$.

Задача нормирования состоит в выборе такого класса состояний среды X , что если для всех t из заданного периода времени $[t_1, t_2]$ функция $x(t) \in X$, то вероятность того, что $y(t) \in Y$ при $t \in [t_1, t_2]$ и $y(t_1) \in Y$ будет меньше заданного значения P_0 .

Рассмотрим одномерный случай. Тогда $x(t)$ и $y(t)$ — одномерные случайные функции. Пусть класс Y определяется ограничением $y(t) < y_{norm}$. Для дальнейшего нормирования необходимо определить оператор A . Как указано в работе [4], в ряде случаев оправдано применение линейной динамической стохастической модели в виде

$$y(t) = y_0 + \int_0^{T_w} \omega(\tau) x(t - \tau) d\tau + \varepsilon_y(t),$$

где y_0 — нормальное (среднее) значение y ; $\omega(\tau)$ — импульсная переходная функция; T_w — эвристически определяемый предел интегрирования; при $\tau > T_w$ значения $\omega(\tau)$ статистически незначимы; ε_y — стохастическая составляющая y .

Обоснование приведенной модели и методы получения значений функций $w(\tau)$ приведены в работе [4].

Пусть ε_y — стационарный гауссовый случайный процесс, $M\varepsilon_y = 0$; $D\varepsilon_y = \sigma^2$. Тогда

$$\begin{aligned} P_{\text{чов}}(y(t) > y_{\text{норм}}) &= P_{\text{чов}}(y_0 + \int_0^{T_w} w(\tau) x(t-\tau) d\tau + \varepsilon_y > y_{\text{норм}}) = \\ &= P_{\text{чов}}(\varepsilon_y > y_{\text{норм}} - y_0 - \int_0^{T_w} w(\tau) x(t-\tau) d\tau) = \\ &= \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\Delta y}^{\infty} e^{-\frac{\zeta^2}{2\sigma^2}} d\zeta, \end{aligned}$$

где
$$\Delta y = y_{\text{норм}} - y_0 - \int_0^{T_w} w(\tau) x(t-\tau) d\tau.$$

Если пренебречь ε_y , то задача нормирования сведется к нахождению условий, накладываемых на $x(t)$, обеспечивающих выполнение соотношения

$$y_{\text{норм}} - y_0 > \int_0^{T_w} w(\tau) x(t-\tau) d\tau.$$

Будем искать ограничения на $x(t)$ в виде комплекса $(T, \{P_{\text{max}}(t_i), t_i\})$. В качестве T можно выбрать любую величину, большую T_w . Пусть $w(\tau)$ — монотонно убывающая функция. Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{T_w} w(\tau) x(t-\tau) d\tau &\leq \int_0^{t_i} w(\tau) P_{\text{max}}(t_i) d\tau = \\ &= P_{\text{max}}(t_i) \int_0^{t_i} w(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$P_{\text{max}}(t_i) = \frac{y_{\text{норм}} - y_0}{\int_0^{t_i} w(\tau) d\tau}.$$

Учет стохастической добавки ε_y даст выражение

$$P_{\text{max}} = \frac{y_{\text{норм}} - y_0 - \delta}{\int_0^{t_i} w(\tau) d\tau},$$

где δ определяется из соотношения

$$P_{\text{чов}}(\epsilon_y > \delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\delta}^{\infty} e^{-\frac{\tau^2}{2\sigma^2}} d\tau = P_0.$$

Если $w(\tau)$ состоит из участка возрастания (при $0 < \tau < \tau_m$) и участка убывания (при $\tau_m < \tau$) (рис. 2), то

$$\int_0^{\tau_w} w(\tau) x(t - \tau) d\tau \leq \int_{\tau_m}^{t_i + \tau_m} w(\tau) P_{\text{max}}(t_i) d\tau.$$

При этом

$$P_{\text{max}} = \frac{y_{\text{норм}} - y_0 - \delta}{\int_{\tau_m}^{t_i + \tau_m} w(\tau) d\tau}$$

или, если пренебречь δ ,
$$P_{\text{max}} = \frac{y_{\text{норм}} - y_0}{\int_{\tau_m}^{t_i + \tau_m} w(\tau) d\tau}.$$

Отметим, что наиболее распространенное выражение для импульсной переходной функции $w(\tau) = ae^{-\lambda\tau}$.

Это выражение широко применяется в литературе для описания реакции биологических систем на стрессоры и подтверждено исследованиями для случая воздействия ЭМИ и тепла на организм оператора.

Рассмотрим теперь случай воздействия нескольких факторов на организм человека. В настоящее время нормируется совместное действие ЭМИ и температуры воздуха, ЭМИ и рентгеновского излучения, а также концентрации химических веществ однопавленного действия.

Ограничимся рассмотрением действия двух факторов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ на один параметр функционального состояния человека $y(t)$. Пусть при фиксированном значении другого параметра получены оценки для функций w :

$$w_1(\tau) = a_1 e^{-\lambda_1 \tau}; \quad w_2(\tau) = a_2 e^{-\lambda_2 \tau}.$$

В этом случае возможны следующие варианты: 1) $\lambda_1 \approx \lambda_2$; 2) $\lambda_1 > \lambda_2$.

В первом случае мы можем построить модель Гаммерштейна

$$y(t) = y_0 + \int_0^{\tau_w} e^{-\lambda\tau} f(x_1(t - \tau); x_2(t - \tau)) d\tau.$$

При этом часто можно ограничиться линейной функцией $f(x_1, x_2) = b_1 x_1 + b_2 x_2$. Методы идентификации таких моделей приводятся в [5]. Построив такую модель, мы получаем возможность заме

нить нормирование пары факторов x_1, x_2 нормированием одного фактора $x_3 = f(x_1, x_2)$. Методы нормирования x_3 аналогичны указанным выше для нормирования одного воздействующего фактора.

Во втором случае следует построить линейную модель

$$y(t) = y_0 + \int_0^{T_w} (a_1 e^{-\lambda_1 \tau} x_1(t - \tau) + a_2 e^{-\lambda_2 \tau} x_2(t - \tau)) d\tau = \\ = y_0 + \int_0^{T_w} a_1 e^{-\lambda_1 \tau} x_1(t - \tau) d\tau + \int_0^{T_w} a_2 e^{-\lambda_2 \tau} x_2(t - \tau) d\tau.$$

Подставляя вместо x_1 и x_2 функции, равные $P_{1, \max}(t_i)$ и $P_{2, \max}(t_i)$ в течение интервала времени $[t - t_i; t]$ и 0 при других t , получаем условие

$$y_{\text{норм}} > y_0 + \frac{a_1 (1 - e^{-\lambda_1 t_i}) P_{1, \max}(t_i)}{\lambda_1} + \frac{a_2 (1 - e^{-\lambda_2 t_i}) P_{2, \max}(t_i)}{\lambda_2}.$$

Указанным выше способом можно выработать гибкие нормы, применимые для комплекса вредных производственных факторов. Эти нормы после тщательной всесторонней проверки могут быть применены в качестве ограничений при оптимизации по экономическому или технологическому критерию.

Список литературы: 1. *Справочник по гигиене труда*/Под ред. В. Д. Карпова, В. Е. Ковшило, Л., 1979. 446 с. 2. *Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Антипов В. В.* Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. М., 1984. 176 с. 3. *Платонов Г. А.* Эргономика на железнодорожном транспорте. М., 1986. 296 с. 4. *Дзюндзюк Б. В., Степанова Т. И.* Идентификация реакции человеческого организма на воздействие условий труда и оптимизация технологических процессов с точки зрения охраны труда//Пробл. бионики. 1987. Вып. 39. С. 87—91. 5. *Растргин Л. А., Маджаров Н. Е.* Введение в идентификацию объектов управления. М., 1977. 216 с.

Поступила в редколлегию 16.03.87

УЛК 881 3 06