

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОЛЛЕКТИВА

**А.В. Зайнишев¹, Г.А. Круглов¹, Ю.И. Аверьянов²,
И.М. Кирпичникова², В.Ф. Бухтояров²**

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматривается способ математического моделирования производственного коллектива (оперативно-выездных бригад) на основе теории информационных цепей для исследования и оценки показателей производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости в электроэнергетическом комплексе Российской Федерации. Разрабатывается рабочая гипотеза о низкочастотном характере внешних факторов, воздействующих на рабочий коллектив. Предлагается в качестве входных переменных рассматривать травмообразующие факторы и факторы, приводящие к производственно-обусловленной заболеваемости, а также информационно-обучающие потоки, а в качестве выходных – производственный травматизм и производственно-обусловленную заболеваемость.

Ключевые слова: производственный травматизм, производственно-обусловленная заболеваемость, производственный коллектив, математическое моделирование, теория информационных цепей.

На современном этапе развития электроэнергетического комплекса Российской Федерации сохраняется довольно сложное положение с условиями и безопасностью труда электромонтеров, в первую очередь, членов оперативно-выездных бригад (ОВБ). К сожалению, у данных лиц не прослеживается тенденция к снижению количества травм и производственно-обусловленных заболеваний. Подобная ситуация приводит к необходимости совершенствовать известные и изыскивать новые, более эффективные методы и технические средства безопасности труда на основе изучения закономерностей технологических, трудовых и естественно-производственных процессов.

Любая статистическая информация по производственному травматизму предполагает рассмотрение не отдельных участников трудового процесса, а производственных (рабочих) коллективов, состоящих из n -го количества работников. При этом число n может меняться от 2–3 человек (электромонтеры ОВБ) до нескольких десятков и сотен (сотрудники РЭС и т. д.).

Современные рабочие коллективы, состоящие из специалистов разного возраста, социального уровня и образования, представляют собой сложные социальные системы [1]. Это позволяет говорить о необходимости создания методов исследования и прогнозирования динамических свойств таких систем, в первую очередь, производственно-травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. Методы эти могут быть как экспериментальными, так и теоретическими. В на-

стоящее время сложились условия для разработки теоретического подхода, который базировался бы на достижениях прикладной математики, электротехники и теории подобия.

Математическая модель объекта представляет собой совокупность уравнений динамики отдельных составляющих рабочего коллектива в процессе работы. Методика исследования подобных процессов в таких отраслях, как механизация и автоматизация производства, подробно представлена в работах [2, 3]. Эти методы при определенных допущениях дают широкие возможности для всестороннего исследования динамических свойств социальных систем. Общий недостаток указанных методов в том, что процесс подготовки уравнений к расчетам достаточно сложен. Расчет математической модели рабочего коллектива на ЭВМ требует привлечения специальных вычислительных методов.

Следующая группа теоретических методов связана с исследованиями математических моделей, составленных из уравнений, описывающих схемы замещения динамических систем. Для дифференциальных уравнений, описывающих сложные системы, характерно большое разнесение собственных частот. Поэтому в основу дальнейших исследований возможно, на наш взгляд, принятие допущения, что на показатели травматизма рабочего коллектива существенно влияние оказывают низкочастотные входные колебания. В связи с этим формируется задача упрощения математической модели. Известен ряд работ, направленных на

решение данной задачи, в которых широко применяется метод разделения движений [4, 5], позволяющий суммировать математическую модель сложной системы, адекватную низкочастотному диапазону колебаний. Этот метод основан на применении теории возмущений. Метод заключается в составлении уравнений, описывающих «быстрые» и «медленные» составляющие. Задача состоит в том, чтобы получить уравнения только для основных, в рассматриваемом случае «медленных» составляющих. Особенностью такой модели является то, что она базируется на больших параметрах элементов, способных накапливать потенциальную и кинетическую энергию.

При разработке рабочей гипотезы о низкочастотном характере внешних факторов, воздействующих на рабочий коллектив, представляется правомерным использование методики, представленной в работах [6, 7]. Процесс носит случайный характер [8] и соответствует нормальному закону распределения, плотность распределения вероятностей которого описывается выражением [9]:

$$\varphi(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(x - \bar{x})^2 / (2\sigma_x^2)], \quad (1)$$

где \bar{x} , σ_x и σ_x^2 – среднее значение, стандарт и дисперсия случайной величины X .

Анализ спектральной плотности показывает, что в нем присутствуют в основном низкочастотные колебания. В рассматриваемом случае входными переменными будут являться травмообразующие факторы и факторы, приводящие к производственно-обусловленной заболеваемости, а также информационно-обучающие потоки, а выходными – производственный травматизм и производственно-обусловленная заболеваемость.

В общем случае математические ожидания выходных показателей определяются по формуле [6]:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x) dx, \quad (2)$$

где $f(x)$ – функциональная зависимость, устанавливаемая при аппроксимации кривой, описывающей динамику производственного травматизма; $\varphi(x)$ – плотность распределения вероятностей аргумента x .

Опыт создания методик контроля и управления социальными системами в сфере охраны труда показывает, что их разработка, как правило, начинается в условиях недостаточной информированности об условиях работы, характере и интенсивности возмущающих воздействий и соответствии исходных требований ожидаемым результатам [10]. В современных условиях на фоне общего снижения объемов опытно-конструкторских работ разработка средств автоматизации и информатизации в отрасли практически прекратилась, в то время как в развитых странах уровень оснащенности такими средствами непрерывно растет [10]. Такая ситуация объясняется тем, что продолжение работ в этом направлении по ранее применявшейся

ся технологии требует привлечения ресурсов и специалистов, которыми сейчас не располагают научно-исследовательские организации отрасли.

Выход из этой ситуации может быть связан только с переходом к другой технологии создания и освоения средств автоматизации и информатизации, в которой будет существенно снижен уровень затрат на разработку, изготовление и последующую доработку специализированных методик (при этом можно значительно сократить стадию экспериментальных исследований).

Математическое моделирование на ЭВМ производственного травматизма представляет машинный эксперимент, позволяющий оперативно и без больших затрат оценить влияние на рабочий процесс любого фактора, в том числе и такого, который трудно поддается натурному моделированию. Моделирование позволяет быстро получить сравнительные оценки для коллективов, различающихся по структуре и решаемым производственным задачам, что редко достижимо в натурном эксперименте. Все это делает целесообразным применение математического моделирования при выборе рациональных параметров и состава коллектива, формировании «эталонных» или «оптимальных» характеристик травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. Кроме этого, возможен поиск причин, вызывающих отклонение реальных характеристик от «эталонных», выявление предельных возможностей коллектива и поиск путей его модернизации.

Трудности, ограничивающие использование методов математического моделирования, обычно связаны с составлением вычислительной программы, ее последующей корректировкой для расширения круга решаемых задач или существенным изменением структурной схемы исследуемого коллектива. Эти трудности усугубляются еще и тем, что часто одному и тому же исследователю приходится сталкиваться с различными типами коллективов, работники которых могут решать совершенно разные задачи. Для составления корректных уравнений динамики рабочих процессов требуются достаточные знания в области теории, которыми владеют только специалисты соответствующего профиля. Следует также иметь в виду и возрастающую сложность программ.

Моделирование на прикладном уровне включает в себя схематизацию социальной системы в виде сосредоточенных элементов, обладающих способностью как накапливать энергию (потенциальную или кинетическую), так и необратимо ее рассеивать.

Адекватная динамическая модель должна удовлетворять двум основным требованиям: обеспечивать правильное качественное отображение динамических процессов и количественное описание этих процессов с принятой степенью точности. Под оптимальной адекватной динамической моде-

люю понимается максимально простая модель, удовлетворяющая указанным двум требованиям адекватности. Под составной динамической системой понимается система, состоящая из двух или более взаимодействующих между собой динамических подсистем. Составные динамические системы позволяют при их исследовании использовать характеристики подсистем. Динамические характеристики подсистем могут быть найдены по материалам научных исследований. Поэтому составную динамическую модель можно описать меньшим числом дифференциальных уравнений, а, следовательно, проще разработать алгоритм расчета на ЭВМ. Кроме того, необходимо, чтобы математическая модель отвечала таким требованиям, как наглядность, простота формализации, доступность для специалистов смежных областей.

Методика опирается на упоминавшийся выше подход, основанный на формировании схем замещения объектов по аналогии с методом, применяемым в теории электротехники. Она позволяет определять передаточные функции динамических систем по схемам замещения, а их динамические свойства исследовать на основе анализа амплитудно-частотных характеристик входных и выходных параметров. При этом методика учитывает вероятностный характер внешнего влияния.

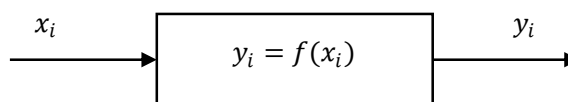
Рабочий коллектив – система, которая характеризуется наличием неоднородных компонентов, оснащенных различными управляющими подсистемами. В ряде случаев она имеет разветвленный характер, вследствие чего отмечается взаимное влияние друг на друга отдельных ее компонентов. Все это находит отражение в характере протекания динамических процессов в исследуемой системе. В частности, отмечается возможность резонансных явлений в низкочастотном диапазоне колебаний. Анализ этих процессов, определение путей и средств снижения амплитуд колебаний усложняется из-за взаимосвязанности компонентов.

Исследованию динамических процессов в таких сложных системах посвящен ряд работ отечественных и зарубежных специалистов: А.А. Балчитиса, А.С. Антонова, В.Л. Вейца, И.И. Вульфсона, Л.Я. Банаха, Ю.А. Вантусова, В.С. Жабреева, Н.И. Чепелева, С.В. Белова, Бенфилда, Хейла, Уорена и др. В их трудах изложены методы формирования детерминированных математических моделей сложных систем. Обзор научных работ в отмеченном направлении говорит о том, что решение поставленных задач стало возможным благодаря достижениям в области прикладной математики, теоретических основ электротехники, теории подобия. Разработанные в данных исследованиях методы функций случайных аргументов и электротехнических аналогий предназначены для анализа свойств сложной системы при вероятностной нагрузке.

Отличительной особенностью функционирования любого рабочего коллектива при выполне-

нии различных технологических операций является вероятностно-статистический характер внешних воздействий, обусловленный многочисленными переменными факторами, непрерывно изменяющимися во времени.

К ним, прежде всего, относятся изменения параметров микроклимата производственных помещений (температура и влажность воздуха, скорость воздушных потоков), колебания освещенности рабочих поверхностей, шум, вибрация и т. д. Входные внешние воздействия, представляющие собой случайные процессы (см. рисунок), оказывают влияние на основные выходные переменные величины $y_i(t)$, определяющие производственный травматизм и производственно-обусловленную заболеваемость. Из-за случайного характера внешних факторов $x_i(t)$ выходные функциональные параметры $y_i(t)$ могут рассматриваться в виде случайных процессов или случайных последовательностей.



Модель «вход – выход» системы: x_i – входная величина; y_i – выходная величина; $y_i = f(x_i)$

Чтобы учесть случайные факторы при обосновании оптимальных режимов работы коллектива в процессе выполнения технологических операций, необходимо установить вероятностно-статистические оценки показателей – математические ожидания $M(y)$, дисперсии $D(y)$, стандарты σ_y , коэффициенты вариации ν_y , а также некоторые другие количественные характеристики.

При установлении вероятностно-статистических оценок выходных параметров применяется метод функций случайных аргументов. Его сущность состоит в том, что коллектив рассматривается в виде модели «вход – выход» (см. рисунок).

Входная x_i и выходная y_i – переменные величины, которые определяются детерминированной (неслучайной) функциональной зависимостью $y_i = f(x_i)$. В качестве функций связи применяются функции, полученные при аппроксимации кривых, полученных после статистической обработки данных о состоянии производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости на исследуемом предприятии.

Входная величина x_i представляет собой случайную величину – «травмообразующие факторы», подчиняющуюся арксинусному закону распределения:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{A_x^2 - (x - \bar{x})^2}}, & \text{при } (x - \bar{x}) < A_x; \\ 0, & \text{при } (x - \bar{x}) \geq A_x, \end{cases} \quad (3)$$

где $x = \bar{x} + A_x \sin(2\pi f_0 t + \theta_k)$ – входной показа-

тель, аппроксимируемый уравнением синусоиды; f_0 – частота колебаний входной величины; θ_k – случайная начальная фаза; \bar{x} – среднее значение входной величины; A_x – амплитуда входной величины.

Оценочные показатели M_y , D_y , σ_y , ν_y выходных величин рассчитываются по формулам [6]:

- математическое ожидание

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} y\varphi(y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x) dx; \quad (4)$$

- дисперсия

$$D(y) = \int_{-\infty}^{\infty} [y - M(y)]^2 \varphi(y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - M(y)]^2 \varphi(x) dx; \quad (5)$$

- среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_y = \sqrt{D(y)}; \quad (6)$$

- коэффициент вариации

$$\nu_y = \frac{\sigma_y}{M(y)}; \quad (7)$$

где $\varphi(y) = \varphi(x)|dx/dy|$ – плотность распределения вероятностей случайной величины y ; $\varphi(x)$ – плотность распределения вероятностей аргумента x ; $f(x)$ – функциональная зависимость, устанавливаемая при аппроксимации кривых, полученных после статистической обработки данных о состоянии производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости на исследуемом предприятии.

Таким образом, для основных оценок показателей травматизма с учетом вероятностного характера внешних воздействий необходимо установить функцию связи $f(x)$ и закон распределения аргумента $\varphi(x)$.

Литература

1. Жабреев, В.С. *Элементы теории больших систем (теория информационных цепей в управлении): учеб. пособие* / В.С. Жабреев, И.А. Рыжкова, К.В. Федяев. – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2000. – 88 с.

2. Кутьков, Г.М. *Тяговая динамика тракторов* / Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.

3. Шипилевский, Г.Б. *Создание единой математической модели МТА* / Г.Б. Шипилевский // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2000. – № 3. – С. 17–19.

4. Банах, Л.Я. *Методы разделения движения при упрощении динамических систем* / Л.Я. Банах // *Виброзащита человека-оператора и колебания в машинах*. – М., 1977. – С. 331–335.

5. Вульфсон, И.И. *Агрегатирование и декомпозиция разветвленных колебательных систем цикловых механизмов* / И.И. Вульфсон // *Машиноведение*. – 1980. – № 6. – С. 20–27.

6. Агеев, Л.Е. *Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения* / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 415 с.

7. Юсупов, Р.Х. *Повышение эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата за счет совершенствования статических и динамических характеристик его энергетической части: автореф. дис. ... д-ра техн. наук* / Р.Х. Юсупов. – СПб., 1993. – 37 с.

8. Чепелев, Н.И. *Методы и технические средства повышения безопасности операторов при технологических отказах сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук* / Н.И. Чепелев. – Красноярск, 2004. – 33 с.

9. Вентцель, Е.С. *Теория вероятностей: учеб. для вузов* / Е.С. Вентцель. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

10. Шипилевский, Г.Б. *Перспективная технология создания и освоения средств автоматизации* / Г.Б. Шипилевский // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2000. – № 6. – С. 17–19.

Зайнишев Альфред Варисович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Переработка сельскохозяйственной продукции и безопасность жизнедеятельности», Институт агроинженерии, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск; rsodk-alfred@yandex.ru.

Круглов Геннадий Александрович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Энергоснабжение и автоматизация технологических процессов», Институт агроинженерии, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск.

Аверьянов Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bgd-susu@mail.ru.

Кирпичникова Ирина Михайловна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kirpichnikovaim@susu.ru.

Бухтояров Василий Фёдорович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bukhtoyarovvf@susu.ru.

Поступила в редакцию 23 августа 2018 г.

PREDICTION OF OCCUPATIONAL INJURIES IN THE ELECTRIC POWER COMPLEX OF THE RUSSIAN FEDERATION ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PRODUCTION TEAM

A.V. Zainishev¹, rsodk-alfred@yandex.ru,

G.A. Kruglov¹,

Yu.I. Averianov², bgd-susu@mail.ru,

I.M. Kirpichnikova², kirpichnikovaim@susu.ru,

V.F. Bukhtoyarov², bukhtoyarovvf@susu.ru

¹ South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article considers a method of mathematical modeling of the production team (operational teams) based on the theory of information chains aimed at studying and evaluating the indicators of occupational injuries and work-related morbidity in the electric power complex of the Russian Federation. The article presents a developed hypothesis on the low frequency nature of external factors impacting the work team. It is suggested to consider injury provoking factors, factors resulting in work-related morbidity information, and educational flows as the input variables, with industrial injuries and work-related morbidity regarded as output values.

Keywords: occupational injuries, work-related morbidity, manufacturing team, mathematical modeling, the theory of information chains.

References

1. Zhabreev V.S., Ryzhkova I.A., Fedyaev K.V. *Elementy teorii bol'shikh sistem (teoriya informatsionnykh tsepey v upravlenii): uchebnoe posobie* [Elements of the Large Systems Theory (the Theory of Information Chains in Management)]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2000. 88 p.

2. Kut'kov G.M. *Tyagovaya dinamika traktorov* [Traction Dynamics of Tractors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 215 p.

3. Shipilevskiy G.B. [Creating a Unified Mathematical Model of MTA]. *Traktory i sel'skokozyaystvennye mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2000, no. 3, pp. 17–19. (in Russ.)

4. Banakh L.Ya. [Methods of Motion Separation in the Simplification of Dynamic Systems]. *Vibrozhachita cheloveka-operatora i kolebaniya v mashinakh*. [Vibration Protection of the Operator and Machine Vibrations], 1977, pp. 331–335. (in Russ.)

5. Vul'fson I.I. [Aggregation and Decomposition of Branched Oscillatory Systems of Cyclic Mechanisms]. *Mashinovedenie* [Machine Science], 1980, no. 6, pp. 20–27. (in Russ.)

6. Ageev L.E., Shkrabak V.S., Morgulis-Yakushev V.Yu. *Sverkhmoshchnye traktory sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Heavy Duty Tractors for Agricultural Purposes]. Leningrad, Agropromizdat. Leningradskoe otdelenie Publ., 1986. 415 p.

7. Yusupov R.H. *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya mashinno-traktornogo agregata za schet sovershenstvovaniya staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik ego energeticheskoy chasti. Avtoref. dokt. diss.* [Improving the Efficiency of Machine-Tractor Units by Perfecting the Static and Dynamic Characteristics of the Energy Unit. Abstract of doct. diss.]. St. Petersburg, 1993. 37 p.

8. Chepelev N.I. *Metody i tekhnicheskie sredstva povysheniya bezopasnosti operatorov pri tekhnologicheskikh otkazakh sel'skokhozyaystvennoy tekhniki*. Avtoref. dokt. diss. [Methods and Technical Means of Improving the Safety of Operators During Process Upsets of Agricultural Machinery]. Krasnoyarsk, 2004. 33 p.

9. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov* [Probability Theory]. 5th ed. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1998. 576 p.

10. Shipilevskiy G.B. [Perspective Technology of Creation and Mastering of Automation Equipment]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2000, no. 6. pp. 17–19. (in Russ.)

Received 23 August 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Прогнозирование состояния производственного травматизма в электроэнергетическом комплексе Российской Федерации на основе анализа динамических свойств математической модели производственного коллектива / А.В. Зайнишев, Г.А. Круглов, Ю.И. Аверьянов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 75–80. DOI: 10.14529/power180309

FOR CITATION

Zainishev A.V., Kruglov G.A., Averianov Yu.I., Kirpichnikova I.M., Bukhtoyarov V.F. Prediction of Occupational Injuries in the Electric Power Complex of the Russian Federation on the Basis of the Analysis of the Dynamic Properties of the Mathematical Model of the Production Team. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 75–80. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180309
