

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

УДК 681.514+614.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАБОЧИХ КОЛЛЕКТИВОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЦЕПЕЙ

Р.Х. Юсупов (г. Москва, МГАУ), Ю.Г. Горшков, А.В. Зайнишев (г. Челябинск, ЧГАУ)

В статье рассматривается способ математического моделирования производственного коллектива на основе теории информационных цепей для исследования и оценки показателей производственного травматизма и профессионально-обусловленной заболеваемости.

Состояние производственного травматизма и профессионально-обусловленной заболеваемости в энергетике и других отраслях промышленности приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых, более эффективных методов и технических средства обеспечения безопасности труда на основе изучения закономерностей технологических, трудовых и естественно-производственных процессов.

Современные производственные объекты представляют собой сложные динамические системы со случайным характером большинства входных воздействий. Выходные переменные, к которым относятся и показатели безопасности труда, являются, как правило, случайными процессами и полями [1–3]. Последнее недостаточно учитывается в современной методологии управления безопасностью труда. Существующие модели и алгоритмы для прогнозирования несчастных случаев не дают описания механизма снижения или устранения вероятности травмирования. Известные методики оценки эффективности трудовой деятельности, прогнозирования травматизма и средства его предупреждения [2, 3] разрабатываются параллельно и взаимно между собой не увязаны, что объясняет крайне низкий социально-экономический эффект от затрат на предупреждение травматизма.

Повышение безопасности участников трудового процесса может быть обеспечено систематизацией методов и средств, полученных идентификацией вероятностных моделей функционирования технологических и социальных систем. В этом случае методология обеспечения безопасности основывается на анализе частотных характеристик технологических и социальных процессов и их динамическом синтезе по критериям безопасности. Полученные таким образом параметры технологических и социальных процессов являются научно обоснованным исходным материалом для разработки методов и средств повышения безопасности участников трудового процесса.

Любая статистическая информация по произ-

водственному 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 до нескольких тысяч. Современные рабочие коллективы, состоящие из специалистов разного возраста, социального уровня и образования, представляют собой сложные социальные системы [4]. Это позволяет говорить о необходимости создания теоретических методов исследования и прогнозирования динамических свойств таких систем, в том числе производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. По нашему мнению в настоящее время сложились условия для разработки теоретического подхода, базирующегося на достижениях теории информационных цепей и теории нечетких множеств. При этом обеспечивается универсальность теоретических методов, простота, доступность и наглядность.

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 сельскохозяйственного производства, подробно представлена в работах [5–8]. Эти методы, при определенных допущениях, дают широкие возможности для всестороннего исследования динамических свойств социальных систем.

При разработке рабочей гипотезы о низкочастотном характере внешних факторов, воздействующих на рабочий коллектив, на наш взгляд, правомочно использование методики, представленной в работах [7, 8]. Процесс носит случайный характер и соответствует нормальному закону распределения [1], 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 .

В нашем случае входными переменными бу-

дуть являются факторы производственной среды, то есть факторы, приводящие к профессиональной заболеваемости и травматизму, а также информационно-обучающие потоки и совокупность защитных средств (в том числе средств индивидуальной защиты), а выходными – производственный травматизм и профессионально-обусловленная заболеваемость.

В общем виде математические ожидания выходных показателей [7]:

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

где $f(x)$ – функция, устанавливаемая при аппроксимации кривой, описывающей зависимость производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости от входного параметра; $\varphi(x)$ – плотность распределения вероятностей аргумента x .

При выборе рациональных параметров и состава коллектива, формировании «эталонных» или «оптимальных» характеристик травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости целесообразно математическое моделирование. С его помощью возможен поиск причин, вызывающих отклонение реальных характеристик от «эталонных», выявление предельных возможностей коллектива и поиск путей его модернизации.

Методика моделирования опирается на упоминавшийся выше подход, основанный на формировании схем замещения объектов на основе теории информационных цепей. Под информационной цепью будем подразумевать совокупность источников и носителей информационных потоков, составляющих динамическую систему и взаимосвязанных по факторам, возникающим в результате внешнего воздействия [10]. Методика 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 может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В ряде случаев она имеет разветвленный характер, вследствие чего отмечается взаимное влияние друг на друга отдельных ее подсистем. Все это находит отражение в характере протекания динамических процессов в исследуемой системе. В частности, отмечается возможность неустойчивости исследуемой системы.

Чтобы учесть случайные факторы при обосновании малоопасных 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 v_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». Входная x_i и выходная y_i переменные величины 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. При исследовании динамических процессов в качестве функции связи рассматривается передаточная функция $W(s)$.

Входная величина x_i представляет собой случайную величину – «факторы производственной среды», 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 показатель, 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.

Арксинусный закон предполагает рассмотрение гармонического сигнала со случайной начальной фазой с равномерным распределением.

Таким образом, для основных оценок показателей травматизма с учетом вероятностного характера внешних воздействий необходимо установить функцию связи $f(x)$ (передаточную функцию $W(s)$) и закон распределения аргумента $\varphi(x)$. На наш взгляд, помочь в этом может использование метода информационных цепей [10].

Метод основан на формировании эквивалентной схемы замещения объекта, представляющей собой его топологическое отображение в виде определенным образом связанной совокупности условных обозначений ее элементов. Причем в схему включаются те элементы, которые оказывают существенное влияние на решение задачи.

Рабочий коллектив – система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В большинстве систем можно выделить три типа простейших элементов – носителей энергии (при построении эквивалентных схем используют условные обозначения, принятые в электротехнике):

1.  – элементы, в которых происходят необратимые потери (диссипация) информационной энергии;

2.  – элементы, обладающие способностью накапливать информационную потенциальную энергию;

3.  – элементы, обладающие способностью накапливать информационную кинетическую энергию.

Сочетанием этих простейших элементов может быть получена схема замещения сложной информационной цепи. При построении схемы замещения информационной цепи объекта необходимо исходить из того, что любая его подсистема может быть отображена в виде элементарного блока, представляющего собой определенным образом связанную совокупность элементов, способных как накапливать энергию (потенциальную или кинетическую), так и необратимо ее рассеивать [11] (рис. 1).

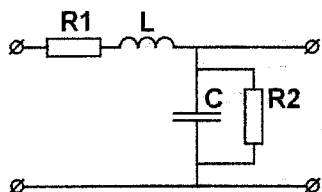


Рис. 1. Схема замещения элементарного блока информационной цепи

Природа последних различна: один из них характеризует потери информации во время обучения (особенность человеческой психики не воспринимать все 100 % входящей информации), а другой – потери информации с течением времени (долговременная память человека постепенно теряет накопленную информацию).

На входе в рабочий коллектив действуют факторы производственной среды – травмообразующие факторы и факторы, приводящие к профессиональной заболеваемости (с учетом того, что по данным медиков 50 % заболеваний так или иначе вызваны производственной деятельностью человека [12]).

Согласно ГОСТ 12.0.003–74 опасные и вредные производственные факторы по природе воздействия подразделяются на четыре вида (рис. 2).

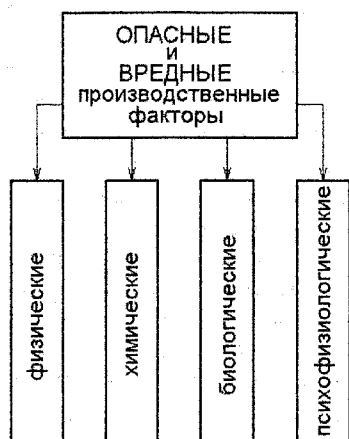


Рис. 2. Опасные и вредные производственные факторы

Принимая данные факторы как вероятностно-статистические процессы, считаем необходимым разделить их на «А» – «аналоговые» (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздушных масс и т.д.) и на «Д» – «дискретные» (наличие или отсутствие заземления, защитных кожухов на электроприводах, крышек люков в полу и т.д.). К дискретным факторам можно отнести и наличие или отсутствие того или иного средства индивидуальной защиты.

«Аналоговость» процесса можно обосновать соображением о непрерывном изменении исследуемой величины с течением времени, т.е. связать физическую величину и время некой функцией:

$$A = f(t), \quad (4)$$

где A – величина аналогового фактора (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха и т.д.); t – время (например, часы рабочей смены или дни года).

Величина той же освещенности рабочих мест обосновывается требованиями СНиПов и ГОСТов, поэтому в больших пределах меняться она не может – соответственно все изменения незначительно варьируются с течением времени вокруг математического ожидания величины, определенной требованиями нормативно-технической документации. На рис. 3 представлена зависимость изменения освещенности рабочего места оператора в течение нескольких суток (при условии, что в данном помещении отсутствует естественная освещенность). Требуется обеспечить нормативную освещенность $E_{\text{норм}} = 300$ лк. График представляет собой одну из реализаций процесса изменения освещенности в анализируемом интервале времени.

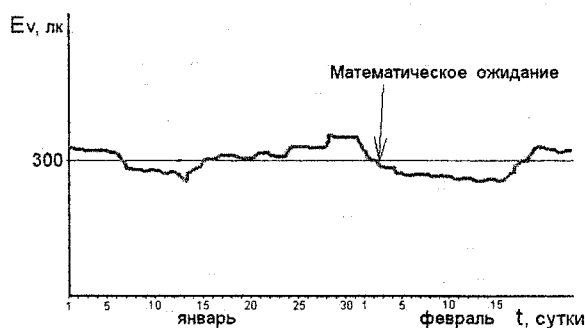


Рис. 3. График изменения освещенности рабочего места оператора

Подобные графики можно составить практически для любого аналогового фактора (рис. 4). Полученный для величин $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ суммарный (эквивалентный) сигнал (рис. 5) можно рассматривать как входной аналоговый.

Большую сложность представляют для исследования дискретные факторы. Для упрощения можно обозначить присутствие того или иного устройства безопасности или средства труда как

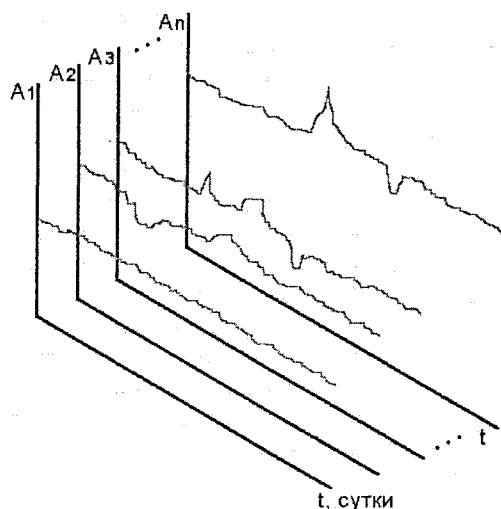


Рис. 4. Графики изменения аналоговых факторов с течением времени

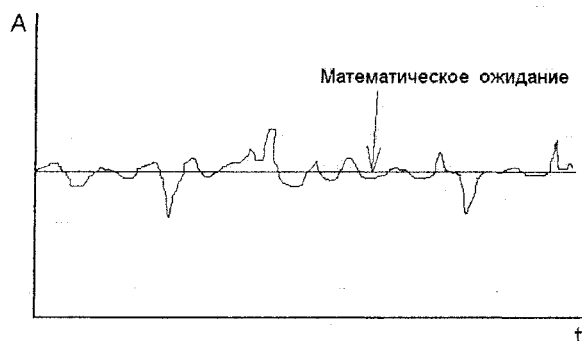


Рис. 5. Эквивалентный сигнал изменения аналоговых факторов производственной среды с течением времени

«единицу», отсутствие – как «ноль». В таком случае величина (амплитуда) сигнала с течением времени (рабочей смены) не меняется, однако на другой день ситуация может измениться (рис. 6). Как видно из графика, в начале года защитный кожух электропривода открыт, но затем он закрывается (на несколько дней). Так же можно проследить динамику использования любого средства либо объекта (рис. 7). Например, в рассматриваемый день может быть восстановлено заземление или

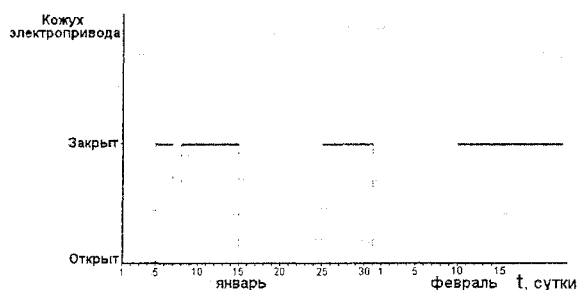


Рис. 6. График изменения состояния кожуха электропривода

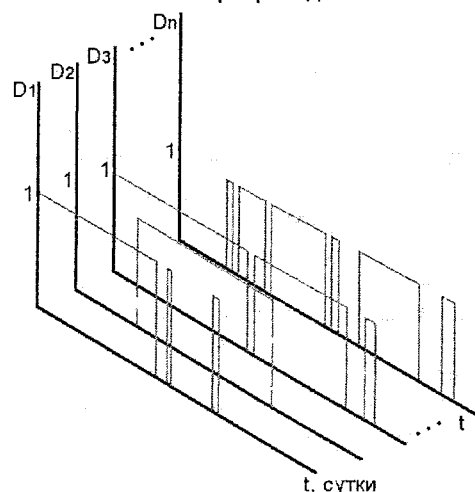


Рис. 7. Графики изменения дискретных факторов с течением времени

может появиться отсутствующий огнетушитель (накануне величина данных факторов была равна «нулю»), но может одновременно оказаться не закрытым люк в полу (который до этого был закрыт – накануне величина данного фактора была равна «единице»), либо не использован респиратор (которым рабочий накануне пользовался, а при отсутствии контроля со стороны непосредственного начальника поленился).

Сложность исследования данного процесса в том, что для анализа случайного процесса необходимо использовать процедуру частотного демодулирования – амплитуда всех «столбиков», представляющих каждый тот или иной фактор безопасности, неизменна, но частотная плотность меняется с течением времени. На рис. 8 представлен суммарный график импульсных факторов. В случае же с аналоговыми процессами для эквивалентного сигнала используются методы анализа случайных процессов [9].

Необходимо отметить, что аналоговые факторы в основном приводят к развитию профессиональных заболеваний (например, высокая влажность при низкой температуре воздуха приводит к хроническому воспалению верхних дыхательных

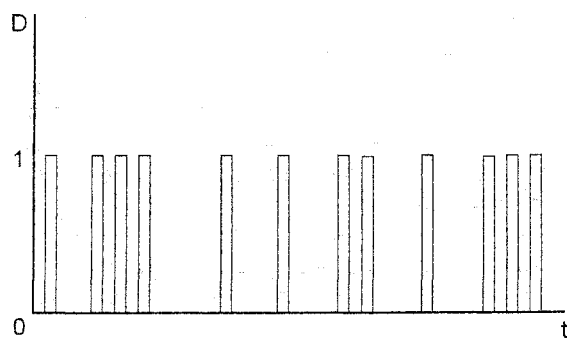


Рис. 8. Эквивалентный сигнал изменения дискретных факторов производственной среды с течением времени

путей), а дискретные – к травмам (отсутствие заземления может вызвать электротравму, отсутствие защитного кожуха электропривода – ампутацию конечности). Тем не менее, нельзя полностью разделять эти два потока – некоторые аналоговые входные воздействия могут приводить к травмам (например, низкая освещенность), а дискретные – к профессиональным заболеваниям (например, отсутствие вентиляционных люков). При этом можно оценить коэффициент взаимной корреляции между этими двумя потоками.

Кроме факторов производственной среды и защитных средств в систему входит обучающая информация (лекционные занятия при проведении повышения квалификации, самостоятельные занятия в системе самообразования, а также инструктажи – повторные, целевые и внеплановые).

Входная информация поступает в производственный коллектив, который можно представить в виде эквивалентной схемы замещения (рис. 9).

Диссипативный элемент $R1$ – резистор, в котором необратимо теряется часть поступающей информации. Влияние на данный процесс могут оказывать факторы окружающей среды – всякое отклонение от их нормативных параметров приводит к потере части информации.

Индуктивный элемент $L1$ – накопитель кинетической энергии потока информации – можно представить как сопротивление входному потоку информации, зависящее от интенсивности ее подачи. Считаем уместным представлять данный элемент как нелинейную индуктивность, обладающую способностью к насыщению. При частых инструктажах потребитель информации находится в области насыщения, проводимость индуктивного элемента снижается и информационный КПД системы «источник информации – потребитель информации» резко падает.

Далее информация откладывается в долговременной памяти человека – емкостном элементе $C1$, накапливающем потенциальную энергию потока знаний. С течением времени накопленная информация теряется – конденсатор шунтируется резистором $R2$, проводимость которого колеблется в значительных пределах, в том числе в зависимости от возраста отдельного человека или среднего возраста работников коллектива. В дальнейших исследованиях необходимо обосновать оптимальную периодичность как проверки знаний, так и проведения инструктажей и повышения квалификации, учитывая величину эквивалентного сопротивления данного диссипативного элемента.

Как указывалось выше, любой рабочий коллектив – это сложная система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В ряде случаев она может иметь разветвленный ха-

рактер. На рис. 9 представлена эквивалентная схема замещения коллектива в общем виде, где параллельные ветви будем именовать цехами (от a до m), а последовательно включенные блоки – подразделениями (от 1 до n).

На выходе системы появляются два случайных процесса – производственный травматизм и профессионально-обусловленная заболеваемость. В данном случае оба процесса носят аналоговый характер, что облегчает их перевод в частотную форму для дальнейших исследований.

Таким образом, на входе в систему действуют три фактора – обучающая информация (в том числе инструктажи), защитные средства и факторы производственной среды. На выходе системы – производственный травматизм и производственно-обусловленная заболеваемость. Выдвигается гипотеза о том, что, изменяя параметры одного из входных факторов – обучающей информации, можно добиться снижения величин производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. Параметрами, на которые можно влиять в процессе производственной деятельности коллектива, являются частота проведения и объем повторных инструктажей. Данные параметры должны быть представлены в виде частотных характеристик. В условиях случайного характера входного сигнала (обучающей информации), такой характеристикой является спектральная плотность процессов, которая может быть получена в результате обработки статистических данных о периодичности и объеме инструктажей, проводимых на предприятии. На выходе системы будем рассматривать спектральную плотность процесса травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости, которая так же может быть получена в результате обработки статистических данных. Спектральные плотности процессов на входе $S(\omega)_{ВХ}$ и выходе $S(\omega)_{ВЫХ}$ производственного коллектива как динамической системы связаны соотношением [8]:

$$S(\omega)_{ВЫХ} = |W(j\omega)|^2 S(\omega)_{ВХ}, \quad (5)$$

где $|W(j\omega)|$ – модуль комплексной передаточной функции производственного коллектива как динамической системы.

В дальнейших исследованиях можно определить периодичность проведения и объем повторных инструктажей, при которых производственный травматизм и производственно-обусловленная заболеваемость работников предприятия будут минимальны. Проблема заключается в определении численных величин элементов эквивалентной схемы замещения и идентификации передаточной функции и функции связи. Для этих целей предполагается в числе других методов задействовать математический аппарат теории нечетких множеств [2].

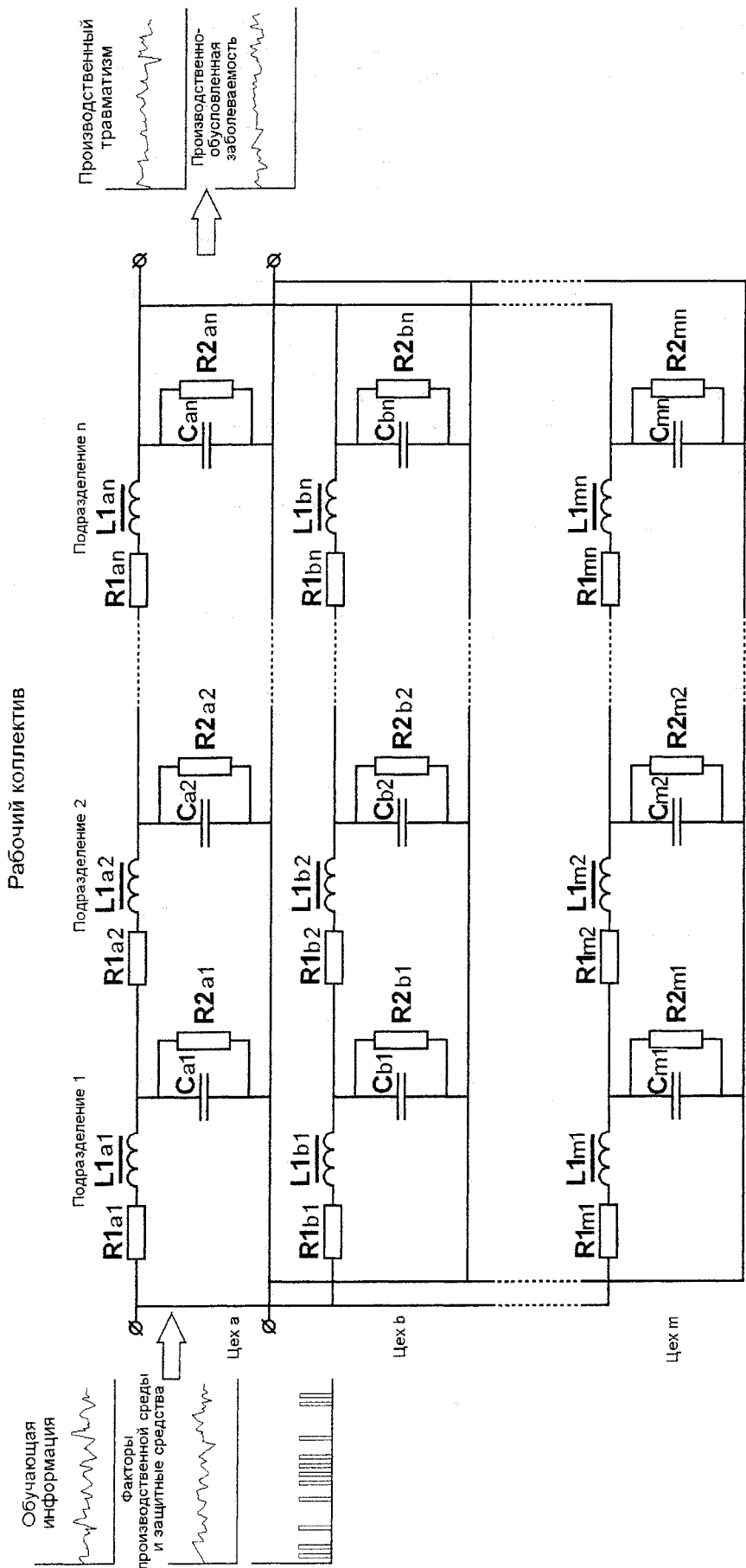


Рис. 9. Эквивалентная схема замещения производственного коллектива как динамической системы в общем виде

Литература

1. Чепелев, Н.И. Методы и технические средства повышения безопасности операторов при технологических отказах сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... докт. техн. наук/ Н.И. Чепелев. – Красноярск, 2004. – 33 с.
2. Номоконова, О.В. Применение нечетких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ О.В. Номоконова. – Челябинск, 2003. – 19 с.
3. Спиридонова, Е.В. Разработка системы аттестации по электробезопасности персонала электроустановок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Е.В. Спиридонова. – Челябинск, 2004. – 18 с.
4. Жабреев, В.С. Элементы теории больших систем (теория информационных цепей в управлении): учебное пособие / В.С. Жабреев, И.А. Рыжкова, К.В. Федяев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 88 с.
5. Шипилевский, Г.Б. Создание единой математической модели МТА/ Г.Б. Шипилевский// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 3. – С. 17–19
6. 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.
7. Агеев, Л.Е. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 415 с.
8. Юсупов, Р.Х. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата за счет совершенствования статических и динамических характеристик его энергетической части: Автореф. дис. ... докт. техн. наук/ Р.Х. Юсупов – С.-Петербург, 1993. – 37 с.
9. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.
10. Денисов, А.А. Теория больших систем управления: учебное пособие для вузов/ А.А. Денисов, Д.Н. Колесников. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
11. Юсупов, Р.Х. К вопросу моделирования информационных систем / Р.Х. Юсупов, А.В. Зайнишев// Труды XXV Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 60-летию Победы. – Уральское отделение РАН, Екатеринбург, 2005. – С. 260–262.
12. Безопасность жизнедеятельности: Безопасность труда: учебное пособие/ М.А. Пережогин, Ю.Г. Горшков, С.В. Чернышев и др., под общ. ред. М.А. Пережогина. – Челябинск, 1996.

Юсупов Рамазан Хабибрахманович – Московский государственный агроинженерный университет, профессор кафедры «Системы управления», доктор техн. наук.

Горшков Юрий Германович – Челябинский государственный агроинженерный университет, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, доктор техн. наук, профессор.

Зайнишев Альфред Варисович – Челябинский государственный агроинженерный университет, кафедра безопасности жизнедеятельности, канд. техн. наук, доцент.