

УДК 517.9; 629.735.017

## ОСЦИЛЛЯТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВНУТРИ МАЛОЙ СОЦИАЛЬНОЙ ГРУППЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТЕ

А.И. ИВАНОВ

**Статья представлена доктором технических наук Николайкиным Н.И.**

Работа посвящена вопросам самоорганизации в малых группах, например, работников организаций промышленности и транспорта, включая авиацию, в том числе экипаж воздушного судна. Каждому члену малой группы поставлен в соответствие нелинейный диссипативный автоколебательный осциллятор Ван-дер-Поля. Модель описывает взаимодействие членов группы друг с другом через синхронизацию осцилляторов, что позволяет учесть и взаимосодействие, и противодействие, и сосуществование двух видов взаимодействия в качестве сложной природы единства и борьбы противоположностей для выделенного центра взаимодействия как обязательного атрибута малой группы.

**Ключевые слова:** малая группа, самоорганизация, синхронизация, состояние равновесия, фазовый портрет, бифуркация, особые точки, предельные циклы, промышленность, транспорт, авиация.

### Введение

Вопросы самоорганизации в малых группах различных категорий персонала предприятий и организаций промышленности и на транспорте, включая авиацию (например, экипаж воздушного судна, работников бригад, участков, цехов, отделов и т.п.), играют существенную роль во влиянии на величины рисков и на особенности их проявления [1] в процессе реализации авиатранспортных услуг, предоставляемых авиатранспортной системой.

Существенной особенностью процесса подготовки любого опасного производственного объекта к эксплуатации [2] (в том числе процесса подготовки воздушного судна к полету) является накопительный эффект рисков, управление которыми, как следует из анализа модели свертки факторов 9-и основных факторов-критериев производственной среды, основанной на их дихотомии [3], целесообразно рассматривать как динамическую систему.

При изучении социальных явлений обычно заранее считается, что некоторое явление и, тем более, его динамика являются необычайно сложными. Малые социальные группы отличаются от сложных систем не социальной природы прежде всего тем, что элементами систем-групп являются люди, которые имеют индивидуальный интеллект, свои желания, стремления, симпатии и антипатии. При рассмотрении сложных систем социальной природы основную проблему представляет именно математическая формализация. Применение методов нелинейной теории колебаний, качественного анализа фазового портрета системы позволяет формализовать малую социальную группу и значительно упростить ее математическое описание. Эмерджентные свойства сложной социально-экономической системы приводят к образованию особых структур коллективного поведения в фазовом пространстве.

В настоящее время не вызывает сомнения, что социально-экономические системы и малые группы в том числе являются открытыми и неравновесными. В силу своей открытости они могут обмениваться с внешней средой информацией, энергией, энтропией и даже элементами. Если приток отрицательной энтропии из внешней среды достаточно значителен, то суммарная величина энтропии системы может понижаться, что ведет к образованию в системе «структур» коллективного поведения, которым в математической модели соответствуют структуры фазового пространства: фокусы (и другие особые точки), предельные циклы, странные аттракторы и т.д.

К динамическим процессам в малых группах отнесем формирование группы, включение в группу нового участника или изменение состава группы, явления группового давления на индивида, групповой сплоченности, лидерства, принятия групповых решений, необходимость в

которых возникает в процессе развития совместной деятельности, и др. Изменение малой группы происходит постоянно – вследствие взаимодействия людей в социальной среде. Наибольшее значение для управления развитием группы имеет формируемый субъектами взаимодействия информационный поток.

### Описание модели

В предыдущих работах [4; 5] показано, что в малой социальной группе существует выделенный центр взаимодействия (ВЦВ). При этом ВЦВ обладает дуализмом. С одной стороны, это цель, результат; с другой стороны – это конфликт. Отметим, что, рассматривая конфликт с разных позиций, никто из предыдущих исследователей не выделяет единство двух противоположных подходов, которое мы определили как ВЦВ.

Кроме того, выделенный центр взаимодействия обладает свойством эмерджентности: обобщенное движение ВЦВ не дает нам картину поведения отдельного индивида, оно выступает результатом совместных, пусть и противоречивых, действий.

Поведение малой группы может быть описано через обобщенное движение выделенного центра взаимодействия с помощью дифференциального уравнения второго порядка

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \omega_0^2 x = f(t, x),$$

где обобщенная виртуальная координата  $x$  символически представляет направление движения к «цели»; коэффициент  $k$  описывает диссипацию – сопротивление системы внешнему воздействию;  $\omega_0^2$  – аналог собственной частоты системы (ее квадрата), описывает внутренние свойства системы; функция  $f(t, x)$  описывает внешнее воздействие на систему, где наличие зависимости от переменной  $x$  связано с обратной связью.

За обобщенную скорость могут быть приняты: скорость усвоения или обработки информации; скорость принятия решения; количество действий (решений) в единицу времени.

$\ddot{x}$  – обобщенное виртуальное ускорение ВЦВ показывает, как меняется со временем обобщенная скорость, например, количество действий или решений, выполненных в единицу времени, поскольку в общем случае эта величина не постоянна. Изменение обобщенной скорости должно быть вызвано некоторой причиной, т.е. взаимодействием.

Таким образом, мы описали движение общего группового ВЦВ дифференциальным уравнением второго порядка. Также и интерес отдельного члена группы, его собственный ВЦВ можно описать аналогично. Поэтому моделью отдельного члена группы становится нелинейный диссипативный осциллятор – динамическая система, мгновенное состояние которой задается двумя величинами: обобщенной координатой  $x$  и обобщенной скоростью  $\dot{x}$ . При наличии внешнего периодического воздействия в уравнениях появляются члены, содержащие явную зависимость от времени, и нелинейный осциллятор превращается в неавтономную систему, которая может демонстрировать сложную динамику и переход к хаосу.

Сопоставим каждому члену малой группы нелинейный диссипативный автоколебательный осциллятор Ван-дер-Поля. Исполнение целей или желаний отдельного члена группы, т.е. активное действие будем описывать возбуждением соответствующего осциллятора. Все члены группы взаимодействуют каждый с каждым, поэтому все осцилляторы связаны попарно. Система принципиально отличается от классической цепочки связанных осцилляторов, т.к. связь не последовательная, а именно каждый с каждым.

Взаимодействие двух автоколебательных осцилляторов при изменении частотной расстройки или величины связи может привести к таким эффектам, как взаимный захват и режим биений. Задача о синхронизации трех, четырех и более осцилляторов является более сложной и вариативной. Естественно, что чем больше число членов группы, тем сложнее система для исследования. Однако в любом случае можно опираться: 1) на взаимодействие пары осцилляторов; 2) на взаимодействие трех осцилляторов, т.к. «треугольник» является основой взаимодей-



изохронность приводит к эффекту второго порядка, комбинирующему воздействие неизохронности и инерционной связи, совместное действие которых аналогично диссипативной связи.

Малая неидентичность по управляющим параметрам  $\lambda$  тоже действует как эффект второго порядка в системе с инерционной связью. Устойчивому режиму синхронизации соответствует сдвиг фаз на  $\theta_{jk} = 3\pi/2$ . Точке  $\theta_{jk} = \pi/2$  соответствует неустойчивое равновесие. Неидентичность в неизохронной системе дает также аддитивную добавку к частотной расстройке.

Таким образом, различные механизмы стремятся привести систему к синхронизации с разным фазовым сдвигом между осцилляторами.

Если взаимодействующие осцилляторы характеризуются разными по величине диссипативными параметрами, отвечающими за отрицательное трение, на плоскости параметров (частотная расстройка – величина связи) появляется новая переходная область, разделяющая квазипериодические режимы и режим гибели колебаний. В этом случае говорят о широкополосной синхронизации, в основе этого режима лежит доминирование одного осциллятора над другим. Для неидентичных по другим диссипативным параметрам (отвечающим за ограничение неустойчивости в системе) осцилляторов в системе возможен эффект смены «лидирующего» осциллятора или пары осцилляторов [7]. Для подробного анализа указанного эффекта далее обратимся к модификации модели, где осцилляторы возбуждаются поочередно парами, в силу периодического изменения параметра, ответственного за бифуркацию рождения предельного цикла. Общий принцип, положенный в основу функционирования этих систем, состоит в манипуляции фазами колебаний при передаче возбуждения между парциальными осцилляторами, которые становятся активными попеременно.

Связь между осцилляторами осуществляется резонансным образом: из сигналов «активной» пары формируются сигналы на частоте колебаний, которые воздействуют на «пассивный» осциллятор во время перехода последнего через бифуркацию рождения предельного цикла и навязывают ему соответствующие фазы. Особенностью системы является строго резонансная связь: возбуждающая сила имеет несущую частоту, совпадающую с частотой колебаний осцилляторов.

Для исследования системы трех связанных каждый с каждым автоколебательных осцилляторов, выключим сначала связи так, чтобы имелась связь только между одной из пар осцилляторов. Это можно сделать тремя способами. Вследствие различия в нашей системе параметров диссипативной связи  $\mu$  этих пар различным будет угол наклона прямых, ограничивающих «язык Арнольда». Анализ фазового портрета показывает, что внутри области захвата в системе имеется четыре неподвижные точки: устойчивый и неустойчивый узел и два седла. Устойчивый узел отвечает за режим полной синхронизации. При выходе из области захвата при пересечении ее границы все четыре точки попарно сливаются. После этого равновесия исчезают, режим полной синхронизации разрушается с возникновением двухчастотных колебаний.

### Парное взаимодействие через смену активной и пассивной фазы

Периодическая модуляция управляющего параметра приводит к тому, что осцилляторы поочередно проходят через активную и пассивную стадии. Каждые полпериода происходит передача фаз от пары осцилляторов к третьему. Для системы такого вида отображение типа отображения Бернулли получается не для фазы колебаний какого-либо осциллятора, а для разности фаз парных осцилляторов. Система демонстрирует гиперболический хаос. При этом в зависимости от выбора правила, по которому передается возбуждение от пары осцилляторов к третьему, получаются различные виды отображения [8]:

$$\frac{da_1}{dt} = a_1(\gamma_0 + \gamma_1 \cos(\Omega t) - |a_1|^2) + \varepsilon a_3^\alpha (a_4)^{1-\alpha};$$

$$\begin{aligned} \frac{da_2}{dt} &= a_2(\gamma_0 + \gamma_1 \cos(\Omega t) - |a_2|^2) + \varepsilon a_3^\beta (a_4)^{1-\beta}; \\ \frac{da_3}{dt} &= a_3(\gamma_0 - \gamma_1 \cos(\Omega t) - |a_3|^2) + \varepsilon a_1^\beta (a_2)^{1-\beta}; \\ \frac{da_4}{dt} &= a_4(\gamma_0 - \gamma_1 \cos(\Omega t) - |a_4|^2) + \varepsilon a_1^\delta (a_2)^{1-\delta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – комплексные медленно меняющиеся амплитуды осцилляторов;  $\gamma_0$  – управляющий параметр;  $\gamma_1$  и  $\Omega$  – соответственно амплитуда и частота периодической модуляции управляющего параметра;  $\varepsilon$  – параметр связи, принятый для простоты изложения одинаковым для всех осцилляторов. Параметр  $\alpha$  – целое число, описывающее нелинейную связь между осцилляторами. При отрицательном  $\alpha$  переходим от соответствующей амплитуды  $a$  к комплексно сопряженной величине.

Если пары осцилляторов поменять: 1-2 и 1-3, то надо вводить фиктивный осциллятор, идентичный первому; 1-3 и 2-3 – фиктивный третьему. Соответственно для каждого случая приравниваем параметры.

Самая сложная ситуация – могут попеременно возбуждаться три пары осцилляторов: 1-2, 2-3, 1-3. Тогда вводим три фиктивных осциллятора:  $1', 2', 3'$ .

Общий принцип состоит в манипуляции фазами колебаний при передаче возбуждения между парциальными осцилляторами, которые становятся активными попеременно, так чтобы трансформация фаз отвечала итерациям отображения с хаотической динамикой. Из сигналов активной пары формируются сигналы на частоте колебаний, которые воздействуют на пассивную пару во время ее перехода через бифуркацию предельного цикла и навязывают ей соответствующие фазы. В зависимости от выбора правила, по которому передается возбуждение от одной пары осцилляторов к другой, т.е. в зависимости от набора параметров получаются различные виды отображения.

### Обсуждения результатов

Каждый член малой группы имеет свою цель, некоторый интерес, ради которого он состоит в этой группе. Конфликт интересов отдельных членов показывает вторую сторону ВЦВ.

Малые группы в силу своей системности всегда образуют иерархическую пирамиду. На нижнем этаже этой пирамиды расположим отдельно взятых членов группы, выбрав их в качестве минимального неделимого элемента системы. Однако выбор единичного элемента относителен, поскольку каждый человек сам по себе является сложной системой. Так же и интерес отдельного члена группы, его собственный ВЦВ можно описать аналогично ВЦВ малой группы. Такой подход олицетворяет предельный переход на более низкий уровень иерархии. Поэтому моделью отдельного члена группы становится нелинейный диссипативный осциллятор – динамическая система, мгновенное состояние которой задается двумя величинами: обобщенной координатой  $x$  и скоростью  $\dot{x}$ . При наличии внешнего периодического воздействия в уравнениях появляются члены, содержащие явную зависимость от времени, и нелинейный осциллятор превращается в неавтономную систему, которая может демонстрировать сложную динамику и переход к хаосу. Диссипативный осциллятор с инерционным возбуждением описывается классической системой уравнений Лоренца с трехмерным фазовым пространством. Как при силовом, так и при параметрическом возбуждении нелинейных диссипативных осцилляторов наблюдается явление синхронизации частоты, которое является ключевым в нашем подходе.

Как известно из классической механики, при соединении материальных точек в систему уравнение для движения центра масс (его аналог – ВЦВ) получается линейной комбинацией уравнений для входящих в систему материальных точек. В сложной нелинейной системе, како-

вой является малая социальная группа, о подобном сложении говорить нельзя. Необходимо рассматривать нелинейные эффекты. Один из основных эффектов – синхронизация, в фазе или в противофазе.

Разделение сложных социальных систем на малые и большие группы ставим в соответствие непрерывным дифференциальным уравнениям для больших групп и дискретным отображениям для малых групп. Переход от малой к большой группе осуществляется по мере продвижения по иерархической пирамиде систем-подсистем. В предельном переходе дискретные уравнения преобразуются в непрерывные.

Используя тот факт, что в теории динамических систем тождественность двух подходов (дифференциальное уравнение и дискретное отображение) считается практически доказанным, можно с уверенностью утверждать: возможность описания поведения малых групп выбранной моделью двумя указанными подходами является косвенным подтверждением правильности выбора модели.

Только выбранная модель адекватно описывает взаимодействие членов группы друг с другом через синхронизацию осцилляторов, т.к. позволяет учесть и взаимосодействие (синхронизация в фазе), и противодействие (синхронизация в противофазе), и сосуществование двух видов взаимодействия в качестве сложной природы единства и борьбы противоположностей введенной нами модели выделенного центра взаимодействия как обязательного атрибута малой группы.

### **Заключение**

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что малая социальная группа должна рассматриваться как самоорганизующаяся динамическая система, в которой возможны различные режимы взаимодействия ее участников.

Нелинейность и эмерджентность малой группы как сложной системы приводит к возникновению целого спектра неоднозначностей в поведении группы, но все они так или иначе моделируются через синфазную либо противофазную синхронизацию, т.е. представляют собой либо единение целей отдельных членов группы, либо их конфликт. Описание взаимодействия членов группы друг с другом через синхронизацию осцилляторов позволяет учесть и взаимосодействие (синхронизация в фазе), и противодействие (синхронизация в противофазе), и сосуществование двух видов взаимодействия в качестве сложной природы единства и борьбы противоположностей введенной нами модели выделенного центра взаимодействия как обязательного атрибута малой группы.

Согласно рассмотренной модели все взаимодействия в малой группе носят резонансный характер. Увеличение числа участников происходит итерационным образом, независимо от знака диссипативной связи, что каждый раз ведет к удвоению числа бифуркаций.

Модель осциллятора Ван-дер-Поля рассматривается как основной структурный элемент сложной системы для моделирования поведения малой группы в широком и узком смысле слова. Синхронизация осцилляторов выступает прообразом взаимодействий внутри малой группы. Рассматривается диссипативная и инерционная связь между осцилляторами по принципу каждый с каждым. Положительная связь ведет к взаимосодействию участников группы, отрицательная связь ведет к противодействию участников. Для учета взаимодействия между парами осцилляторов в модель тройки поочередно парами возбуждающихся осцилляторов вводится фиктивный осциллятор, парный третьему. Переменные параметры системы осцилляторов рассматриваются впервые. Переход системы из динамического в хаотический режим и обратно осуществляется с помощью управления параметрами системы, которые могут изменяться также и случайным образом. Рассмотренная модель подтверждает иерархичность социальных систем, позволяя осуществлять предельный переход от малых групп к большим группам и обратно.

В условиях стохастического воздействия на группу со стороны участников социальных отношений необходимо осуществлять превентивные меры – формировать среду взаимодействия, состав участников взаимодействий и отношения между ними.

Таким образом, самоорганизация в различных малых группах сотрудников предприятий и организаций промышленности и на транспорте (бригад, участков, цехов, отделов и т.п.) существенно важна роль по влиянию на величины рисков и на их проявления. Чрезвычайную важность самоорганизация в малых группах персонала приобретает на опасных производственных объектах, в частности, при предоставлении авиатранспортных услуг в гражданской авиации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Худяков Ю.Г., Николайкин Н.И. Виды рисков и особенности их проявления в авиатранспортной услуге, предоставляемой авиакомпанией // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2009. - № 149. - С. 7–13.
2. Николайкин Н.И., Худяков Ю.Г. Моделирование системы управления рисками при эксплуатации опасных производственных объектов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2012. - № 10. - С. 35–40.
3. Николайкин Н.И., Худяков Ю.Г. Методология оценки влияния условий труда персонала авиапредприятий на риски в авиатранспортных процессах // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 197. - С. 116–120.
4. Иванов А.И., Красюк Т.В. Синергетические модели самоорганизации в малых группах: монография. - М.: Издательство «Спутник+», 2010.
5. Иванов А.И., Красюк Т.В. Синергетические методы учебно-тренировочного процесса и управления спортивной командой. - М.: Издательство «Гермес» МЦ ЗОУО, 2012.
6. Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Тюрюкина Л.В. Синхронизация и многочастотные колебания в цепочке фазовых осцилляторов // Нелинейная динамика. - 2010. - Т. 6. - № 4. - С. 693–717.
7. Тюрюкина Л.В., Пиковский А.С. Гиперболический хаос в нелинейно связанных осцилляторах Ландау-Стюарта с медленной модуляцией параметров // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. - 2009. - Т. 17. - № 2. - С. 99–113.
8. Кузнецов А.П., Емельянова Ю.П., Селезнев Е.П. Синхронизация связанных автоколебательных осцилляторов с неидентичными параметрами // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. - 2010. - Т. 18, - № 2. - С. 62–78.

#### OSCILLATOR MODEL OF INTERACTION WITHIN A SMALL SOCIAL GROUP IN INDUSTRY AND TRANSPORT

Ivanov A.I.

The article deals with the issues of self-organization in small groups for example, personnel of industry and transport enterprises, including aviation and aircraft crew. Van der Pol non-linear dissipative oscillator is the basis of interaction in a small group model. The model describes interaction between the group members through synchronization of oscillators, which allows to take into account interaction, and counteraction, and coexistence of two types of interactions as the complex nature of unity and struggle of opposites for a selected center of interaction as a compulsory attribute of a small group.

**Key words:** small group, self-organization, synchronization, a state of equilibrium, phase portrait, bifurcation, particular points, limit cycles, industry, transport, aviation.

#### Сведения об авторе

**Иванов Александр Иванович**, 1989 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (2005), научный консультант ОАО «Быковский завод средств логического управления» (ОАО «Логика»), автор 15 научных работ, область научных интересов – математическое моделирование социально-экономических систем.