

Методы и меры количественной оценки логистической синхронизации

В.Н. Трегубов

Аннотация - Исходя из современных представлений синхронизация охватывает широкий спектр явлений в различных сферах, поэтому предоставление единого стандартного подхода к ее измерению для различных научных областей затруднено и каждая сфера требует дополнительных специфических исследований, в том числе и в вопросах разработки различных метрик и индикаторов отражающих степень синхронизации взаимодействующих подсистем.

В статье рассмотрены различные подходы к оценке степени синхронизации циклических процессов, которые могут быть использованы в логистических процессах. Представленные меры реализуют различные методы расчета показателя синхронизации и основываются на различных представлениях о ее измерении. Кросскорреляция, рассматривает синхронизацию как скоординированное, последовательное возникновение событий. Такое понимание синхронизации исходит из интуитивного представления о синхронизации, когда она обеспечивается силами внешней координации. Внешнее воздействие создает сильные связи и ведет к быстрому согласованию динамики процессов, а степень кросскорреляции отражает численную степень синхронизации элементов логистического процесса.

При наличии слабых связей можно выполнить спектральный анализ, позволяющий оценить захват базовой частоты одной из подсистем близкой базовой частотой в спектре второй подсистемы. Это проявляется через частотную синхронизацию, а в терминах временной динамики представляется как захват мгновенной фазы одного циклического процесса, мгновенной фазой второго. Для количественной оценки предлагается функция когерентности, которая может принимать значения в интервале от нуля до единицы при этом нулём она является для тех частот, когда фазы двух сигналов во всех случаях принимают независимые друг от друга значения. Затем необходимо нормировать полную спектральную мощность процесса, что позволяет получить обобщенную количественную характеристику синхронизации всех процессов.

Также для количественной оценки синхронизации в логистике предлагается использовать количество информации. Данный подход основан на анализе информационных связей, которые определяют возможность по состоянию одной из подсистем определить состояние связанной подсистемы. Если состояние одной подсистемы однозначно определяет состояние второй, то можно сказать об их полной синхронизации и степень синхронизации равна единице. С другой стороны, когда состояние одной из подсистем слабо влияет на состояние второй, то это свидетельствует о низкой синхронизации.

Ключевые слова — синхронизация, логистика,

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование прогрессивных информационных техно-

логий в логистике создает единую основу для информационной интеграции логистических потоков в рамках единого информационного пространства на основе методологии синхронизации, что предоставляет возможность обеспечить высокую скорость реакции на изменения во внешней среде и подстроить логистический процесс под существующие на данный момент условия. Достижение синхронизации материального, финансового и информационного потоков в рамках логистического процесса предполагают выделение двух направлений синхронизации: по локальным связям между потоковыми процессами внутри одной цепи поставок или синхронизации глобального уровня, направленной на согласование процессов между несколькими цепями поставок. При этом информационные потоки играют координирующую роль, обеспечивая взаимодействие и взаимосогласование других потоковых процессов, что является важным фактором управления в логистических системах [1].

Степень синхронизации взаимодействующих потоков рассматривается как одна из ключевых характеристик эффективности логистического процесса. В данном случае считается, если хотя бы один из параметров взаимодействующих потоков не соответствует потребностям других агентов, то трансформация либо не произойдет вообще, либо будет происходить с низкой эффективностью. Выявление внутренних механизмов синхронизации взаимодействия потоковых процессов, а также разработка методов численного измерения синхронности, дает возможность обеспечить более качественную логистическую обработку и транспортировку, а также минимизировать логистические издержки. Данная статья развивает исследование [2] и направлено на разработку системы показателей для измерения степени синхронизации в логистических процессах.

Теоретической основой синхронизации в цепях поставок могут выступать общенаучные методы, используемые для описания циклических процессов и явлений, протекающих в социально-экономических системах. В частности, может быть использована методология адаптивного управления объектами при наличии информационного взаимодействия между ними. Важным также является переход от локальной логистики (на уровне отдельной компании) к глобальной, включающей задачи обеспечения оптимальной временной и пространственной организации потоковых процессов всех компаний-участников логистической цепи, путем формирования единого информационного пространства или логистического кластера. Эффективность деятельности логистической цепи напрямую зависит от достижения управляемого резонанса внутри нее – как результата синхрони-

зации всех внутренних и внешних потоков [3].

II. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Синхронизация может возникать на различных иерархических уровнях логистической системы, что обуславливает использование различных подходов к ее измерению и предполагает использование разных методов ее достижения. Исходя из современных представлений синхронизация охватывает различные типы явлений, поэтому предоставление единого стандартного определения для различных научных областей затруднено. В своем фундаментальном исследовании Пиковский [4] определяет термин синхронизация для физических явлений, как «взаимное согласование ритмов в результате взаимодействия объектов», в соответствии с Манрубия [5] синхронизированными можно назвать процессы, когда имеется высокая корреляция между динамическими характеристиками взаимодействующих систем. Такая синхронизация характерна для взаимодействия систем, которые демонстрируют колебательное поведение. В зависимости от степени связи параметров колебательных динамических систем, выделяют различные типы синхронизации. Сильная степень связи делает динамическое поведение систем почти неотличимым друг от друга, что свидетельствует о полной синхронизации их параметров. Более слабая степень связи приводит к выравниванию средней частоты колебательных систем, однако, при этом амплитуды колебательных процессов остаются разными, что приводит к возникновению фазовой синхронизации [6].

На основе определений синхронизации в естественных науках, коротко опишем, как данное явление может быть использовано в логистике, а также в чем принципиальная разница синхронизации в логистических системах от синхронизации в производственных системах. Более подробно данные вопросы рассмотрены в

Первые использования термина "логистическая синхронизация" можно найти в зарубежных статьях по логистике, повалились в конце 90-х годов. Согласно Фастабенд логистическая синхронизация возникает, когда присутствует внешняя координация потоков в процессах доставки [7]. Windt [8] определяет логистическую синхронизацию как согласование входящего и выходящего потока. Оба эти определения основываются на философии Just-in-time [9], в соответствии с ней материалы и продукты, перемещаются на следующий производственный или логистический этап, только когда они там необходимы, поэтому обеспечение синхронизации является ключевой функцией логистики. Имитационные исследования подобных процессов подтверждают положительное влияние высокой степени логистической синхронизации в цепочках поставок [10].

Описывая логистическую синхронизацию, необходимо различать внешнюю синхронизацию, которая существует во всей цепи поставок и внутреннюю синхронизацию, которая согласовывает производственные и логистические процессы внутри одного звена цепи или в одной компании. Внешняя логистическая синхронизация распространяется за пределы компании, и может

обеспечиваться созданием информационных связей, сквозным контролем и эффективным обменом информацией по всей цепочке поставок, что снижает вредное воздействие эффекта хлыста [11].

Внутренняя синхронизация фокусируется в первую очередь на согласовании входного элемента с выходом предыдущего узла, например, в производственном процессе. Хорошим примером внутренней синхронизации является сборочная линия, когда все рабочие станции имеют единое время цикла или время такта [12]. Соблюдение времени такта всеми участниками обеспечивает возникновение синхронных явлений, когда последовательные операции выполняются друг за другом и нет нарастания запасов, либо риска возникновения простоя по причине отсутствия материалов.

Другое направление исследований, связано с синхронизацией, возникающей в сложных транспортных системах. Например, Fretter [13] выполнил исследование фазовой синхронизации в железнодорожных расписаниях и обнаружил отрицательную корреляцию между уровнем синхронизации расписаний на железнодорожных станциях и эффективностью и надежностью системы доставки. В связи с этим возникает вопрос о том, может ли слишком большая степень синхронизации оказать негативное влияние на производительность логистической системы и вести к снижению ее эффективности и устойчивости. Активное исследование процессов логистической синхронизации было выполнено для систем общественного транспорта [14]–[16]. Методы основанные на синхронизации позволяют решать задачи классификации и прогнозирования [17] и общей функциональной поддержки транспортного процесса.

Таким образом, измерение степени синхронизма циклических процессов в логистике имеет фундаментальное значение, поскольку позволяет установить «внутренние» изменения, происходящие в структуре аттракторов, определяющих динамику взаимодействующих логистических подсистем. Подобные изменения не всегда возможно увидеть по фазовым портретам и временным реализациям систем. Меры синхронизации имеют и существенное прикладное значение, поскольку они позволяют диагностировать взаимосвязь между циклическими динамическими процессами, и тем самым установить взаимозависимость между взаимодействующими сложными системами [18]. В практических вопросах особенно важно быть в состоянии выполнять количественные измерения, когда динамика процесса "замаскирована" внешним шумом. Такая ситуация возникает в исследованиях сложных логистических систем, когда уровень внешнего шума часто достаточно велик и помехи невозможно убрать. Способность измерять степень согласованности различных процессов позволяет выявить скрытые механизмы, которые существуют в системе. Таким образом, для количественной оценки логистической синхронизации необходим надежный и простой метод, который может быть использован даже в условиях внешних помех.

Существуют различные взгляды на механизмы и полезность обеспечения логистической синхронизации,

явление которой к настоящему времени описано еще недостаточно. Данная статья посвящена метрикам, которые можно использовать для измерения логистической синхронизации в логистическом процессе, различные подходы к измерению степени синхронизации представлены в следующем разделе. Большинство из описанных ниже методов измерения были смоделированы и показали свою работоспособность в условиях компьютерного эксперимента, когда внешний шум либо достаточно мал, либо отсутствует полностью. При этом сами исследуемые сигналы идентичны «внутренними» переменными логистических систем. Подобные условия, однако, не достижимы для большинства практических измерений, поэтому работоспособность любого из описанных алгоритмов требует дополнительных исследований их устойчивости к действию внешних помех и шума.

III. МЕТРИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

A. Измерение синхронизации через кросскорреляцию

Взаимнокорреляционная (кросскорреляционная) функция является мерой линейной синхронизации между двумя одномерными, дискретными временными рядами. Расчет взаимнокорреляционной функции выполняется через стандартный метод оценки степени корреляции двух последовательностей [19]. Эта функция используется для поиска в длинной последовательности более короткой заранее известной. Например, если X и Y это два независимых случайных числа с функциями распределения вероятностей соответственно f и g , тогда взаимная корреляция между ними определяется по формуле:

$$(f \star g)_i \stackrel{\text{def}}{=} \sum_j f_j^* g_{i+j} \quad (1)$$

В формуле через оператор def обозначается сдвиг между временными последовательностями относительно друг друга, а верхний индекс в виде звёздочки означает комплексное сопряжение. В общем случае, для непрерывных функций $f(t)$ и $g(t)$ взаимная корреляция определяется как

$$(f \star g)(t) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\tau)g(t + \tau)d\tau \quad (2)$$

Приведённый показатель синхронизации используется в процессе обработки сигналов, например, для распознавания отраженного от объекта локационного сигнала в условиях помех. Также данный показатель используется для анализа степени случайности процессов и определения их связанности, например, в измерениях и статистике. Данный показатель можно использовать и в связанных логистических процессах для анализа их взаимного согласования. Взаимная корреляция может рассматриваться как мера линейной синхронизации между двумя дискретными временными рядами, описывающими динамику изменения отдельных характеристик логистической системы. Взаимная корреляция показывает, насколько сильна связь между двумя временными рядами

ми в течение фиксированного временного промежутка [20].

Следующая функция позволяет определить показатель взаимной корреляции (кросскорреляции) для двух временных рядов X_t и Y_t для заданного временного интервала $t = 1 \dots N$.

$$C_{(x,y)}(\tau) = \frac{1}{(N - \tau) \sum_{t=1}^N \left(\frac{x_t - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left((y_{t+\tau} - \bar{y}) / \sigma_y \right)} \quad (3)$$

где \bar{x}, \bar{y} - среднее значение

σ_x - стандартное отклонение;

τ - параметр отражающий временной лаг между показателями.

Так как показатель $C_{(x,y)}(\tau)$ является нормализованным, то он может изменяться от -1, что соответствует состоянию полного рассинхрона, 0 - отсутствию синхронизации и 1 - соответствует идеальной синхронизации двух временных рядов.

В случае, если $X = Y$, подобная функция называется автокорреляционной, она отражает повторяемость колебаний во временной последовательности, например автокорреляция используется для описания сезонных колебаний логистических процессов [21].

Степень тесноты связи в последовательности наблюдений временного ряда x_1, x_2, \dots, x_n и $x_{1+\tau}, x_{2+\tau}, \dots, x_{n+\tau}$ (сдвинутых относительно друг друга на τ единиц, или, как обычно говорят, с лагом τ) может быть охарактеризована с помощью коэффициента корреляции

$$\rho(\tau) = \frac{M[(x_t - M[x_t])(x_{t+\tau} - M[x_{t+\tau}])]}{\sigma_x(t)\sigma_x(t + \tau)} = \frac{M[(x_t - a)(x_{t+\tau} - a)]}{\sigma^2} \quad (4)$$

Коэффициент $\rho(\tau)$ показывает корреляцию между членами одного и того же ряда, поэтому его называют коэффициентом автокорреляции, а зависимость $\rho(\tau)$ называется автокорреляционной функцией. Для стационарного временного ряда автокорреляционная функция $\rho(\tau)$ зависит только от лага τ , причем $\rho(-\tau) = \rho(\tau)$. Таким образом при изучении автокорреляционной функции можно ограничиться рассмотрением только положительных значений τ .

Статистической оценкой $\rho(\tau)$ является выборочный коэффициент автокорреляции γ_τ , определяемый по формуле коэффициента корреляции (5), в которой $x_i = x_t$, $y_i = x_{t+\tau}$, а n заменяется на $n - \tau$:

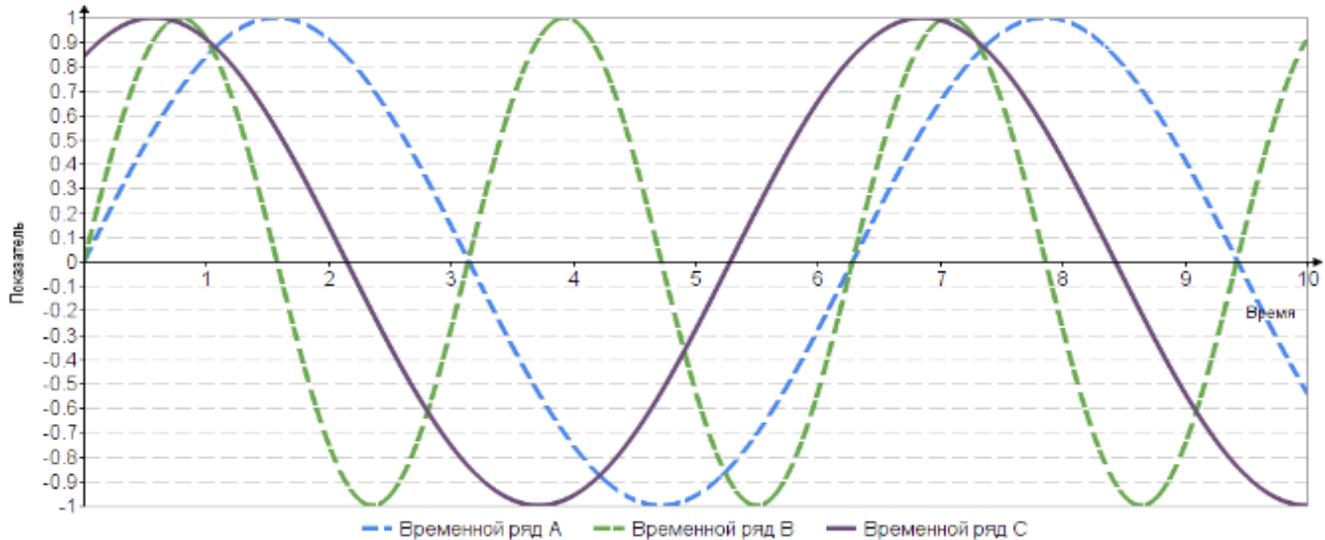
$$\gamma_\tau = \frac{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1+\tau}^n x_{t+\tau}}{\sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t)^2} \cdot \sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1+\tau}^n x_{t+\tau}^2 - (\sum_{t=1+\tau}^n x_{t+\tau})^2}} \quad (5)$$

Функция γ_τ это выборочная автокорреляционная функция, график которой называется коррелограммой. Для стационарного временного ряда с увеличением лага τ взаимосвязь членов временного ряда x_t и $x_{t+\tau}$ ослабевает, а автокорреляционная функция $\rho(\tau)$ убывает по абсолютной величине.

Чтобы лучше проиллюстрировать концепцию кросс-

корреляции в логистических системах, рассмотрим пример синусоидальной динамики для трех временных рядов (см. рис. 1). Все динамические показатели имеют синусоидальную форму графиков и одинаковую ампли-

синхронизации) и 1 (полная синхронизация фазы), представляющее степень синхронизации в зависимости от заданной длины фазы. Пиковский [22] предложил рассматривать состояние фазовой синхронизации хаоса с



туду, однако степень их кросс-корреляции различается.
Рис. 1. Кросс-корреляция синхронных процессов

Показатели взаимной задержки между временными рядами А и В и между А и С различны. Это обусловлено тем, что временные ряды А и В имеют одинаковую частоту, но со смещением на 1 день. Как видно из диаграммы максимальная синхронизация между временными рядами происходит в момент запаздывания – 1 (все пересекаются в одной точке). Временной ряд С имеет самую низкую частоту, следовательно наиболее слабо связан с временными рядами А и В.

В. Измерение фазовой синхронизации

Фазовая синхронизация описывает сцепление фаз для двух или более периодических систем. Например, пусть имеется ряд устройств, которые многократно выполняют одинаковые действия (например, машины на конвейере) с фиксированным промежутком времени между действиями (длина фазы). Тогда если в группе этих устройств все действия выполняются одновременно и для всех них длина фазы одинаковая, то устройства будут синхронизированы по фазе [22].

Показатель синхронизации фазы является ключевым индикатором того, в какой степени события синхронизируются на основе заданной длины фазы [23]. Для количественной оценки фазы синхронизации можно использовать модель Курамото [24]:

$$\beta(\omega) = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\phi_j(\omega)} \right| \quad (6)$$

$$\phi_t(\omega) = \frac{2\pi}{\omega} (t \bmod \omega) \quad (7)$$

Каждое событие в момент времени t может быть переведено на соответствующую фазу в зависимости от длины фазы. Если ряд из N событий t_i вставляется в формулу индекса синхронизации, результирующий индекс — это число между 0 (полное отсутствие фазовой

позиций внешнего подавления диффузии существующей фазы. Это может быть определено, как переход от непрерывного спектра, характерного для периодических процессов с непрерывным временем, к линейчатому спектру. Указанный способ является пригодным для вынужденной внешней синхронизации, которая возникает под действием внешней периодической силы или внешних управленческих воздействий. Для численного измерения такой фазовой синхронизации предлагается исследовать захват фаз спектров колебаний методом вейвлет-анализа.

В дальнейших исследованиях для измерения и численной оценки фазовой синхронизации предложено использовать функцию когерентности как альтернативу мгновенной фазы. Ключевыми преимуществами такого подхода являются: понятная физическая интерпретация, корректность и однозначность определения показателя синхронизации вне зависимости от установившихся циклических режимов, эффективные алгоритмы расчета. Также функция когерентности позволяет определить фазовую синхронизацию в системах с расстройкой по частоте.

IV. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Хаотическая синхронизация (ХС), описывает взаимное подстраивание колебаний в хаотических циклических процессах, которые характерны для сложных логистических систем. Хаотическая синхронизация проявляется разными способами, например, при сильной диффузионной связи хаотические системы, как и периодические, стремятся к полной взаимной согласованности своей динамики, что проявляется либо в достижении их идентичности (так называемая «полная синхронизация хаоса»), либо в возникновении детерминированной взаимосвязи между ними («обобщенная синхронизация», «синхронизация с задержкой») [25].

Концепция ХС используется в ряде исследований для того, чтобы обеспечить переход к идентичным парамет-

рам в связанных друг с другом циклических процессах. В качестве таких параметров могут быть достижения идентичных колебания в связанных осцилляторах, либо с точностью до временной задержки между колебаниями, а также захват базовой частоты в спектре общих хаотических колебаний либо захват мгновенной фазы колебаний и достижения фазовой синхронизации.

Общая неоднозначность используемой терминологии обусловлено большим многообразием возможностей проявления взаимного согласования циклических процессов во взаимодействующих системах. Для лучшего понимания наличие или отсутствие взаимосвязи между различными видами синхронизации хаоса желательно иметь меру описывающую согласованность поведения циклических процессов которая могла бы количественно отражать степень их синхронизации. Также сложных хаотических процессов при изменениях параметров системы может нарушаться синхронизация постепенно через последовательность промежуточных этапов. Например, для полной хаотической синхронизации процесс её разрушения для внешнего наблюдателя будет сопровождаться перемежающимся поведением, которое характерно тем, что часть времени колебания будут происходить синхронно, а часть времени асинхронно.

А. Определение синхронизации хаоса при помощи функции когерентности

При наличии слабой связи можно видеть низкую согласованность базовых временных масштабов процесса, что можно рассматривать в рамках спектрального анализа как захват базовой частоты в рамках спектра одного из осцилляторов близкой базовой частотой в спектре второго осциллятора. Это является проявлением частотной синхронизации, а в терминах временной динамики представляется как захват мгновенной фазы колебаний, мгновенной фазой второго осциллятора.

Характеристика фазовой синхронизации может быть описана в виде формального неравенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)| < M \quad (8)$$

где φ_1, φ_2 – мгновенные фазы для первого и второго осцилляторов

M – положительная константа, отражающая допустимую разность фаз.

Формула (8) показывает, что разность фаз для двух осцилляторов должна быть ограничена во времени, а среднее периоды колебаний могут быть одинаковыми. Слабым местом данного подхода является то, что понятие мгновенной фазы плохо применимо к хаотическим колебаниям в отличие от обычных колебательных процессов. Например, для периодических колебаний, когда аттрактор стабилен понятие фазы позволяет однозначно характеризовать установившееся состояние системы. В таких случаях термин «фаза» часто используется как синоним термина «состояние». Однако уже при квазипериодических колебаниях, когда в системе имеется несколько независимых фаз, характеризовать состояние системы одним параметром становится невозможным.

Поэтому для хаотических циклических процессов требуется иная характеристика синхронизации, хотя

математически и формально верно средняя фаза может быть рассчитана, однако невозможна её адекватная физическая интерпретация, и что она отражает в реальности остаётся непонятным. Мгновенная фаза может быть использована для характеристики когерентного хаоса, который достаточно близок к периодическим колебаниям. Однако, в случае развитого хаоса, когда спектр не содержит выраженных пиков использовать данный показатель является нецелесообразным. Также условия (8) автоматически выполняется в случае, если анализируемые циклические процессы имеют одинаковые характерные для них периоды колебаний, однако в таких случаях мгновенная фаза также не может являться характеристикой синхронизации.

Учитывая указанные обстоятельства, взаимная когерентность двух колебательных процессов $x(t)$ и $y(t)$ может определяться по следующей формуле [26]:

$$\sigma_{xy}(\omega) = \left| \frac{C_{xy}(\omega)}{\sqrt{P_x(\omega)P_y(\omega)}} \right| \quad (9)$$

где $C_{xy}(\omega) = \langle F_x(\omega)F_y^*(\omega) \rangle$ – взаимный спектр,

$P_i(\omega) = \langle F_i(\omega)F_i^*(\omega) \rangle$ – собственный спектр мощности на частоте ω ,

$P_i(\omega)$ – преобразование Фурье от сигнала $i(t)$.

Сама функция когерентности может принимать значения в интервале от нуля до единицы при этом нулём она является для тех частот, когда Фурье-фазы двух сигналов во всех случаях принимают независимые друг от друга значения. В случае, когда фазы полностью захвачены то данный показатель будет равен 1. Мы можем усреднить показатель σ_{xy} по всем частотам с учетом вклада да всех составляющих анализируемого спектра в общую мощность, тем самым нормирован в полную мощность циклического процесса. что позволяет получить обобщенную количественную характеристику синхронизации колебаний для всех частот:

$$S_{xy} = \frac{\int_0^{\infty} (P_x(\omega) + P_y(\omega)) \sigma_{xy}(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} (P_x(\omega) + P_y(\omega)) d\omega} \quad (10)$$

Полученная величина характеризует относительную мощность внутренних синхронных процессов в общей мощности анализируемого логистического процесса. Данная величина также может использоваться в качестве количественной меры хаотической синхронизации, например, как было показано в работах она может описывать процесс разрушения полной синхронизацией хаоса. Диапазон изменения данной величины от 0 до 1, причём единицы она будет равна только тогда, когда изучаемые периодические процессы полностью конкурентной для всех своих частот, а 0 если синхронизация между ними полностью отсутствует [24].

В. Количество информации как мера синхронизации хаоса.

Минимальные требования, которым должны соответствовать мера синхронизации, заключаются в следующем:

отсутствие связи между видом анализируемой системы и показателем синхронизации, что позволяет определить степень синхронизации основываясь только на временной динамике связанных данных по подсистеме

мам;

понятный смысл, позволяющий адекватно интерпретировать результаты измерения степени синхронизации;

универсальность, возможность использования показателя для оценки различных видов синхронизированного взаимодействия подсистем;

устойчивость, означающая, что не существенные изменение режима цикличности, а также искажения и вносимый шум не приведут к значительному изменению показателя синхронизации.

С учетом данных требований в качестве меры синхронизации поведения можно использовать информацию, которую определяет наличие знания о состоянии одной из подсистем и позволяет определить состояние связанной подсистемы. Если состояние одной подсистемы однозначно определяет состояние второй, то можно сказать об их полной синхронизации, тогда степень синхронизации равна единице. С другой стороны, когда состояние одной из подсистем никак не влияет на состояние второй, то это свидетельствует о нулевой синхронизации.

Сформулированный в математической форме этот тезис, полагает, что количественной мерой синхронизации является разность между полной и условной энтропией двух систем подсчитанных для динамики исследуемых показателей подсистем:

$$I = S_x - S_{x|y} \quad (11)$$

Информация будет равна нулю, когда условная и безусловная энтропия равны друг другу, т. е. когда состояние второй подсистемы (y) никак не связано с распределением динамики первой подсистемы (x) и равна максимальному значению, когда состояние второй подсистемы полностью определяет состояние первой. Для перехода к безразмерной величине можно нормировать значение информации на безусловную энтропию. В результате будет получена функция, которая равняется нулю в случае независимого поведения подсистем и возрастает до единицы при их синхронизации.

Расчет степени синхронизации выполняется по выражению:

$$\sigma = \frac{S_x - S_{x|y}}{S_x} \quad (12)$$

где $S_x = -\int p(x) \ln p(x) dx$, $p(x)$ - плотность вероятности по $x(t)$, $S_{x|y} = -\int p(x|y) \ln p(x|y) dx$, $p(x|y)$ - плотность вероятности по $x(t)$, когда состояние второй системы есть y .

Данная мера синхронизации хаоса была исследована для процесса выхода из режима полной синхронизации в системе двух связанных логистических отображений [27]:

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n) \quad (13)$$

$$y_{n+1} = \lambda [y_n + \gamma(x_n - y_n)] (1 - [y_n + \gamma(x_n - y_n)]) \quad (14)$$

где x_n , y_n — анализируемые динамические переменные, γ — параметр, описывающий имеющиеся инфор-

мационные связи. Уравнения (13) и (14) представляют соответственно воздействующую и откликающуюся системы. Связь возникает посредством включения переменной ведущей системы в соответствующую переменную ведомой. Каждое из отображений это отдельная система, которая с ростом параметра λ показывает переход к хаосу через бифуркационный каскад. Сами связанные отображения описываются более сложной динамикой. При этом в фазовом пространстве возможно сосуществование нескольких аттракторов и возникает явление мультистабильности. Когда в определенном диапазоне значений параметра связи система находится в синхронном состоянии, а в области хаоса для отдельного значения параметра λ имеется критическое значение показателя связи, при снижении которого разрушается синхронизация хаотического процесса.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены различные подходы к измерению синхронизации, которые могут быть использованы в логистических процессах. Представленные меры синхронизации описывают различные подходы, к расчету синхронизации, которые можно использовать в логистических системах, основываясь на различных представлениях о ее возникновении.

Кросскорреляция, рассматривает синхронизацию как скоординированное, последовательное возникновение событий. Такое понимание синхронизации исходит из интуитивной представления о синхронизации, как о процессе, который управляется силами внешней координации. Внешнее управление стремится обеспечить экономичность и эффективность функционирования логистической системы. Данный вид синхронизации часто возникает в процессах управления производственными системами. Логистический процесс характеризуется непрерывным потоком товаров или материалов, небольшими интервалами времени между операциями, малым временем ожидания между последовательными операциями, все это приводит к высоким значениям показателя кросскорреляции.

Фазовая синхронизация, с другой стороны, описывает синхронизацию, которая возникает в циклически повторяющихся процессах. Предпосылками для высокой степени фазовой синхронизации является высокая регулярность возникновения событий. В отличие от кросскорреляции, она может возникать даже между двумя сильно изменяющимися временными рядами, если колебания этих рядов согласованы друг с другом. Подобная корреляция не просто вызвана интенсивностью прямого потока материала между рассматриваемыми системами работы. Во-вторых, мера синхронизации фазы предполагает, что в зависимости от рассматриваемой длины фазы, производители рабочих мест можно сказать, что работают на высоком или низком уровне синхронизации.

Необходимы дальнейшие исследования для определения условий и причин возникновения синхронизации в логистических процессах. Сложные логистические системы сталкиваются с различными внутренними и внешними нарушениями, поэтому избыточно согласо-

ванные процессы могут быть легко нарушены в таких нестабильных условиях. Поэтому окончательно не ясно, как достижение и обеспечение синхронизации влияет на производительность логистических систем. Это будет важной областью для дальнейших исследований, которые позволят обосновать оптимальный уровень синхронизации для логистического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Н. Трегубов, “Исследование механизмов синхронизации в различных функциональных сферах логистики,” *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право.*, Т. 20, № 3, С. 292–300, 2020.
- [2] В. Н. Трегубов, “Подход к определению понятия синхронизация в логистических системах,” *Int. J. Open Inf. Technol.*, Т. 8, №4, С. 64–73, 2020.
- [3] А. Е. Бром, “Управление цепями поставок и глобальная логистика,” *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, № 4, С. 68–76, 2007, Accessed: Nov. 09, 2020. [Online]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-tsepyami-postavok-i-globalnaya-logistika-1>.
- [4] А. Н. Пиковский and М. Г. Розенблюм, *Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление*. М.: Техносфера, 2003.
- [5] S. C. Manrubia, A. S. Mikhailov, and D. H. Zanette, *Emergence of Dynamical Order: Synchronization Phenomena in Complex Systems*. River Edge, NJ: World Scientific, 2004.
- [6] V. S. Anishchenko, T. E. Vadivasova, and G. I. Strelkova, “Instantaneous phase method in studying chaotic and stochastic oscillations and its limitations,” *Fluct. Noise Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. L219–L229, 2004, doi: 10.1142/S0219477504001835.
- [7] H. Fastabend, *Kenntnisgestützte Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen*. VDI-Verlag, 1997.
- [8] S. M. Chankov, T. Becker, and K. Windt, “Towards definition of synchronization in logistics systems,” in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 594–599, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.034.
- [9] G. Veselko and I. Jakomin, “Just in time as a logistical supply concept,” *Promet - Traffic - Traffico*, vol. 18, no. 4, pp. 279–283, 2006, doi: 10.7307/ptt.v18i4.697.
- [10] F. Ganji, E. M. Kluge, and B. Scholz-Reiter, “Bringing agents into application: intelligent products in autonomous logistics,” *Artif. Intell. Logist. - Work. ECAI*, pp. 1–6, 2010, [Online]. URL: <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-Z2-10-006-IC.pdf>.
- [11] C. Wycisk, B. McKelvey, and M. Hülsmann, “‘Smart parts’ supply networks as complex adaptive systems: Analysis and implications,” *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 38, no. 2, pp. 108–125, 2008, doi: 10.1108/09600030810861198.
- [12] A. Scholl, *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, vol. 168, no. 3. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1995.
- [13] C. Fretter, L. Krumov, K. Weihe, M. Müller-Hannemann, and M. T. Hütt, “Phase synchronization in railway timetables,” *Eur. Phys. J. B*, vol. 77, no. 2, pp. 281–289, 2010, doi: 10.1140/epjb/e2010-00234-y.
- [14] В. Н. Трегубов, *Методы и модели логистической синхронизации на пассажирском транспорте*. Саратов: СГТУ, 2009.
- [15] В. Н. Трегубов, “Модели синхронизации интересов сторон при выборе тарифа и обосновании потребного количества автобусов на городском маршруте,” *Вестник Саратовского государственного технического университета*, Т. 4, № 1 (42), С. 247–253, 2009.
- [16] В. Н. Трегубов, “Логистика и синхронизация в системе пассажирского транспорта. Развитие концепции синхронизации в логистических системах,” *Российское предпринимательство*, Т. 2, №6, С. 142–146, 2010.
- [17] В. Н. Трегубов, “Прогнозирование показателей развития логистической системы общественного транспорта на основе методологии синхронизации,” *Вестник Саратовского государственного технического университета*, №1 (52), С. 261–269, 2011.
- [18] T. Becker, S. M. Chankov, and K. Windt, “Synchronization measures in job shop manufacturing environments,” *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 157–162, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.027.
- [19] S. Chankov, M. T. Hütt, and J. Bendul, “Synchronization in manufacturing systems: quantification and relation to logistics performance,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 20, pp. 6033–6051, Oct. 2016, doi: 10.1080/00207543.2016.1165876.
- [20] S. M. Chankov, M.-T. Hütt, and J. Bendul, “Influencing factors of synchronization in manufacturing systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 14, pp. 4781–4801, Jul. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1400707.
- [21] S. M. Chankov, G. Malloy, and J. Bendul, “The Influence of Manufacturing System Characteristics on the Emergence of Logistics Synchronization: A Simulation Study,” in *Part of the Lecture Notes in Logistics*, 2017, pp. 29–40.
- [22] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, “Phase synchronization in regular and chaotic systems,” *Int. J. Bifurcat. Chaos*, vol. 10, no. 10, pp. 2291–2305, Oct. 2000, doi: 10.1142/S0218127400001481.
- [23] M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, and J. Kurths, “Phase synchronization of chaotic oscillators,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 11, pp. 1804–1807, 1996, doi: 10.1103/PhysRevLett.76.1804.
- [24] A. Shabunin, V. Astakhov, and J. Kurths, “Quantitative analysis of chaotic synchronization by means of coherence,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 72, no. 1, 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.016218.
- [25] A. V. Shabunin, V. V. Astakhov, V. V. Demidov, and A. V. Efimov, “Multistability and synchronization of chaos in maps with ‘internal’ coupling,” *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 666–675, 2008, doi: 10.1134/S1064226908060089.
- [26] А. В. Шабунин, В. В. Астахов, “Диагностика фазовой синхронизации хаоса при помощи функции когерентности,” *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*, Т. 15, № 5, С. 68–73, 2007, Accessed: Nov. 01, 2020. [Online]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-fazovoy-sinhronizatsii-haosa-pri-pomoschi-funktsii-koherentnosti>.
- [27] А. В. Шабунин, В. В. Демидов, В. В. Астахов, and В. С. Анищенко, “Количество информации как мера синхронизации хаоса,” *Письма в ЖТФ*, Т. 27, №11, С. 78–85, 2001.

Quantitative assessment methods and measures of logistic synchronization

V.N. Tregubov

Synchronization covers a wide range of phenomena in different spheres, but there is not a single standard approach to its measure and each sphere requires additional research for development of various indicators for reflecting the degree of synchronization between interacting subsystems. The article discusses different approaches to estimating the degree of synchronization in logistics processes. We presented some different methods of synchronization indicators based on different ideas about measure it.

The first method is a cross-correlation which uses synchronization as a coordinated, consistent occurrence of events. External influence creates strong links and lead to fast synchronization in logistics process, and the degree of cross-correlation reflects a degree of synchronization between the elements of the logistic process. If there are weak links, a spectral analysis can be used for estimation the capture of the base frequency a subsystem by the base frequency of the second subsystem. This is manifested through clock synchronization, and in terms of dynamics it is represented as an instantaneous phase capture of cyclic process by an instantaneous phase of the second one. For quantitative estimation is proposed a coherence function which can have values in the range from zero to one, while zero is for those frequencies when the phases of the two signals in all cases take independent values. Then it is necessary to normalize the full spectral power of the process. this allows to obtain a generalized quantitative characteristic of synchronization for all processes. We also proposed to use the quantity of information for quantitative evaluation of synchronization in logistics. This approach is based on the analysis of information links, which determine the possibility to determine the state of the first subsystem by the state of the second subsystems. If the state of the first subsystem unambiguously determines by the second one, we can say about their full synchronization and the degree of synchronization is equal to one. On the other hand, when the state of one of the subsystems weakly affects the state of the second one, it indicates a low synchronization.

REFERENCES

- [1] V. N. Tregubov, "Issledovanie mekhanizmov sinhronizacii v razlichnykh funkcional'nykh sferah logistiki," *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo.*, T. 20, № 3, S. 292–300, 2020.
- [2] V. N. Tregubov, "Podhod k opredeleniyu ponyatiya sinhronizatsiya v logisticheskikh sistemah," *Int. J. Open Inf. Technol.*, T. 8, №4, S. 64–73, 2020.
- [3] A. E. Brom, "Upravlenie cepyami postavok i global'naya logistika," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*, № 4, S. 68–76, 2007, Accessed: Nov. 09, 2020. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-tsepyami-postavok-i-globalnaya-logistika-1>.
- [4] A. N. Pikovskij and M. G. Rozenblyum, *Sinhronizatsiya. Fundamental'noe nelinejnoe yavlenie*. M.: Tekhnosfera, 2003.
- [5] S. C. Manrubia, A. S. Mikhailov, and D. H. Zannette, *Emergence of Dynamical Order: Synchronization Phenomena in Complex Systems*. River Edge, NJ: World Scientific, 2004.
- [6] V. S. Anishchenko, T. E. Vadivasova, and G. I. Strelkova, "Instantaneous phase method in studying chaotic and stochastic oscillations and its limitations," *Fluct. Noise Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. L219–L229, 2004, doi: 10.1142/S0219477504001835.
- [7] H. Fastabend, *Kennliniengestützte Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen*. VDI-Verlag, 1997.
- [8] S. M. Chankov, T. Becker, and K. Windt, "Towards definition of synchronization in logistics systems," in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 594–599, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.034.
- [9] G. Veselko and I. Jakomin, "Just in time as a logistical supply concept," *Promet - Traffic - Traffico*, vol. 18, no. 4, pp. 279–283, 2006, doi: 10.7307/ptt.v18i4.697.
- [10] F. Ganji, E. M. Kluge, and B. Scholz-Reiter, "Bringing agents into application: intelligent products in autonomous logistics," *Artif. Intell. Logist. - Work. ECAI*, pp. 1–6, 2010, [Online]. Available: <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-Z2-10-006-IC.pdf>.
- [11] C. Wycisk, B. McKelvey, and M. Hülsmann, "'Smart parts' supply networks as complex adaptive systems: Analysis and implications," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 38, no. 2, pp. 108–125, 2008, doi: 10.1108/09600030810861198.
- [12] A. Scholl, *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, vol. 168, no. 3. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1995.
- [13] C. Fretter, L. Krumov, K. Weihe, M. Müller-Hannemann, and M. T. Hütt, "Phase synchronization in railway timetables," *Eur. Phys. J. B*, vol. 77, no. 2, pp. 281–289, 2010, doi: 10.1140/epjb/e2010-00234-y.
- [14] V. N. Tregubov, *Metody i modeli logisticheskoy sinhronizatsii na passazhirskom transporte*. Saratov: SGTU, 2009.
- [15] V. N. Tregubov, "Modeli sinhronizatsii interesov storon pri vybore tarifa i obosnovanii potrebnogo kolichestva avtobusov na gorodskom marshrute," *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, T. 4, № 1 (42), S. 247–253, 2009.
- [16] V. N. Tregubov, "Logistika i sinhronizatsiya v sisteme passazhirskogo transporta. Razvitiye koncepcii sinhronizatsii v logisticheskikh sistemah," *Rossijskoe prodprinatel'stvo*, T. 2, №6, S. 142–146, 2010.
- [17] V. N. Tregubov, "Prognozirovaniye pokazatelej razvitiya logisticheskoy sistemy obshchestvennogo transporta na osnove metodologii sinhronizatsii," *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, №1 (52), S. 261–269, 2011.
- [18] T. Becker, S. M. Chankov, and K. Windt, "Synchronization measures in job shop manufacturing environments," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 157–162, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.027.
- [19] S. Chankov, M. T. Hütt, and J. Bendul, "Synchronization in manufacturing systems: quantification and relation to logistics performance," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 20, pp. 6033–6051, Oct. 2016, doi: 10.1080/00207543.2016.1165876.
- [20] S. M. Chankov, M.-T. Hütt, and J. Bendul, "Influencing factors of synchronization in manufacturing systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 14, pp. 4781–4801, Jul. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1400707.
- [21] S. M. Chankov, G. Malloy, and J. Bendul, "The Influence of Manufacturing System Characteristics on the Emergence of Logistics Synchronization: A Simulation Study," in *Part of the Lecture Notes in Logistics*, 2017, pp. 29–40.
- [22] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, "Phase synchronization in regular and chaotic systems," *Int. J. Bifurcat. Chaos*, vol. 10, no. 10, pp. 2291–2305, Oct. 2000, doi: 10.1142/S0218127400001481.
- [23] M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, and J. Kurths, "Phase synchronization of chaotic oscillators," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 11, pp. 1804–1807, 1996, doi: 10.1103/PhysRevLett.76.1804.
- [24] A. Shabunin, V. Astakhov, and J. Kurths, "Quantitative analysis of chaotic synchronization by means of coherence," *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 72, no. 1, 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.016218.
- [25] A. V. Shabunin, V. V. Astakhov, V. V. Demidov, and A. V. Efimov, "Multistability and synchronization of chaos in maps with 'internal' coupling," *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 666–675, 2008, doi: 10.1134/S1064226908060089.
- [26] A. V. Shabunin, V. V. Astakhov, "Diagnostika fazovoy sinhronizatsii haosa pri pomoshchi funktsii kogerentnosti," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Prikladnaya nelinejnaya dinamika*, T. 15, № 5, S. 68–73, 2007, Accessed: Nov. 01, 2020. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-fazovoy-sinhronizatsii-haosa-pri-pomoschi-funktsii-kogerentnosti>.
- [27] A. V. Shabunin, V. V. Demidov, V. V. Astakhov, and V. S. Anishchenko, "Kolichestvo informatsii kak mera sinhronizatsii haosa," *Pis'ma v ZHTEF*, T. 27, №11, S. 78–85, 2001.