

© 2020 г. И.И. БЛЕХМАН, д-р физ.-мат. наук (iliya.i.blekhman@gmail.com)
(Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

ЧАСТОТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ И ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ В ЯВЛЕНИЯХ МИКРОМИРА

Отмечается активный интерес Ю.И. Неймарка к исследованиям частотной синхронизации, а также его существенная поддержка исследований в этой области. Обсуждаются основные, еще не вполне установившиеся, определения и понятия теории частотной синхронизации. Рассматриваются существенные различия между явлениями синхронизации, самосинхронизации и захватывания. Подчеркивается часто игнорируемая принадлежность самосинхронизации к явлениям самоорганизации. Перечисляются некоторые актуальные нерешенные проблемы теории частотной синхронизации. В их числе вопрос о возможной фундаментальной роли синхронизации в микромире, который обсуждается подробно. Высказывается мнение о целесообразности попытки описания физической реальности едиными детерминированными законами физики с учетом перечисленных в статье и других новых достижений нелинейной динамики.

Ключевые слова: синхронизация, самосинхронизация, захватывание, тенденция к синхронизации, самоорганизация, синергетика, устойчивость, квантование, универсальность, явления микромира, нерешенные проблемы.

DOI: 10.31857/S000523102008005X

1. Введение. Ю.И. Неймарк и проблемы синхронизации

Юрий Исаакович Неймарк активно интересовался проблемой частотной синхронизации. Этой проблеме посвящена обстоятельная публикация [1]; см. также [2].

Посвящая эти строки светлой памяти Юрия Исааковича, хотелось бы рассказать о нескольких встречах с ним, которые сыграли существенную роль в развитии работ по синхронизации и повлияли на научную судьбу автора.

Мое первое знакомство с Ю.И. Неймарком относится к 50–60-м гг. XX в. По приглашению А.И. Лурье Юрий Исаакович выступал на городском семинаре в Ленинградском политехническом институте. Это был яркий и очень интересный доклад, касающийся гомоклинических структур. Мне помнится, что Юрий Исаакович уже тогда говорил об эффектах сложного (“хаотического”) поведения простых динамических систем, т.е. несколько ранее, чем появилась знаменитая статья Лоренца о странном аттракторе [3]. А.И. Лурье и другие участники слушали доклад с большим вниманием и интересом, было много вопросов.

Второе воспоминание относится к более позднему периоду. Во время пребывания в Горьком на одной из защит диссертаций Юрий Исаакович пригласил меня прокатиться на катере по Волге. Во время поездки в свободной

непринужденной форме Юрий Исаакович говорил о разных проблемах теории нелинейных колебаний и, в частности, о том, что следует относить к нелинейным явлениям, и о простых моделях нелинейных явлений. Он высказал соображение, что, с определенной точки зрения, таких явлений всего четыре — захватывание, синхронизация, затягивание и асинхронное возбуждение колебаний.

Третье воспоминание относится к обсуждению заявки сотрудников института Механобр на открытие явления синхронизации вращающихся тел в Институте проблем механики РАН (Москва). Руководитель семинара академик А.Ю. Ишлинский был исключительно нейтрален по отношению к рассматриваемым вопросам. В то же время среди участников семинара были видные ученые, выступавшие против регистрации заявки. Их доводы состояли в том, что открытие Х. Гюйгенсом синхронизации маятников уже покрывает собой проблему, а также что самосинхронизация, в сущности, уже рассмотрена в работах А.А. Андропова и его учеников, относящихся к проблеме захватывания. Мои возражения заключались в том, что самосинхронизация вращающихся тел существенным образом отличается от синхронизации колебаний маятников и, кроме того, в отличие от маятников имеет существенные технические приложения. Что же касается захватывания, то оно, скорее, относится к вынужденным колебаниям в нелинейных системах при заданной фиксированной частоте, в то время как синхронизация представляет собой выработку единого, заранее неизвестного ритма движения системы. Юрий Исаакович убедительно поддержал эту точку зрения, что и обеспечило одобрение заявки Советом.

Четвертое воспоминание относится к последним дням жизни Юрия Исааковича, когда автор статьи с профессором П.С. Ландой посетили его, уже тяжело больного в его квартире на улице Пискунова. Юрий Исаакович тогда высказал предположение о том, что явления синхронизации играют существенную роль в процессе эволюции. В частности, он обратил внимание на то, что значительный интерес представляют не только случаи устойчивой самосинхронизации, но и выпадение из ритма вследствие неустойчивости. Можно надеяться, что эти соображения получают свое продолжение в дальнейших исследованиях.

Юрий Исаакович сказал также, что изменил свои взгляды на паранормальные явления, в частности на опыты с нагревом и сгибанием ложек. “Возможно, — сказал он, — в этом есть что-то, чего мы не понимаем, может быть, здесь проявляется та же синхронизация”. Автор вспомнил об этих словах, когда узнал недавно, что таких же взглядов на паранормальные явления придерживается Нобелевский лауреат Брайан Джозефсон, причастный к теме настоящей заметки [4].

Автор считает большой удачей близкое знакомство с этим выдающимся ученым, его внимание, поддержку и дружеское расположение. Каждая беседа и встреча с Юрием Исааковичем вызывала желание заниматься наукой и наталкивала на новые плодотворные размышления. Глубокая благодарность этому замечательному ученому и человеку — продолжателю знаменитой Горьковской школы теории нелинейных колебаний.

2. Синхронизация, самосинхронизация, захватывание

Частотная (гюйгенсова) самосинхронизация — удивительное свойство динамических объектов самой различной природы вырабатывать единый ритм движения, несмотря на различие индивидуальных ритмов.

Частотная синхронизация состоит в том, что два или несколько объектов, совершающих при отсутствии взаимодействия периодические колебания или вращения с различными средними частотами, при наличии подчас весьма слабых связей между ними движутся с одинаковыми средними частотами, причем устанавливаются определенные фазовые соотношения между колебаниями или вращениями [5].

При этом под средними частотами понимаются величины $\omega = 2\pi/T$, где T — период колебаний или время одного полного оборота. Таким образом, можно говорить не о совпадении средних частот при синхронизации, а о совпадении соответствующих периодов колебаний или вращений. При частотной самосинхронизации координаты объектов могут отличаться. Совпадают лишь их средние частоты или периоды движения.

Приведенное вербальное определение относится к случаю, который может быть назван простой самосинхронизацией. Под кратной самосинхронизацией понимается случай, когда между средними частотами колебаний или вращений устанавливаются линейные однородные соотношения с целочисленными коэффициентами.

Явление захватывания существенно отличается от явления самосинхронизации. При самосинхронизации синхронная частота вырабатывается всеми объектами как равноправными. Обычно эта частота является некоторой средней между частотами объектов — она меньше наибольшей и больше наименьшей из частот объектов (парциальных частот). Система в целом при этом является автономной. Захватывание может относиться к одному единственному объекту. Частота же задается внешним объектом, она считается заданной и неизменной. Эта частота “навязывается” внешним источником и она может быть как больше, так и меньше частоты объекта. Система при этом является неавтономной.

Расширение неавтономной системы за счет включения в нее источника возмущения “ограниченной мощности” необходимо при решении задач о самосинхронизации, что и было выполнено в первой публикации по теории синхронизации вибровозбудителей, а также в теории эффекта Зоммерфельда [6]. Позднее соответствующее расширение на задачи о вынужденных колебаниях было инициировано В.О. Кононенко [7, 8].

Вместе с тем захватывание может рассматриваться как предельный частный случай частотной самосинхронизации, а именно когда один из объектов является значительно более мощным, чем остальные, и генерируемая им частота может считаться заданной и неизменной. Таким образом, захватывание в определенном смысле подобно вынужденным колебаниям. Обнаружению и исследованию эффектов захватывания посвящены исследования классической горьковской школы, возглавляемой А.А. Андроновым [9].

Иногда под синхронизацией некоторые исследователи имеют в виду захватывание. В дальнейшем, говоря о синхронизации, будем иметь в виду именно

частотную самосинхронизацию, если только не оговаривается иное. Заметим также, что известное явление вибрационного поддержания вращения представляет собой не что иное, как захватывание вращательного движения.

Самосинхронизации можно противопоставить принудительную синхронизацию, когда последняя осуществляется не за счет имеющихся в системе “естественных” связей, а путем введения некоторых синхронизирующих элементов или использования системы управления. К принудительной синхронизации можно отнести и захватывание. Частотная самосинхронизация – природное явление, а принудительная синхронизация – результат управления.

Под тенденцией к синхронизации понимается наличие у системы связанных объектов по крайней мере одного устойчивого в том или ином смысле синхронного движения, т.е. движения, в котором объекты движутся с равными или кратными средними частотами (угловыми скоростями).

Самосинхронизация, несомненно, относится к явлениям самоорганизации. При этом она была открыта и исследована значительно раньше, чем другие такие явления [10]. Это обстоятельство, как правило, не отмечается исследователями, относящими свои публикации к синергетике (Г. Хакен).

Частотная самосинхронизация является частным случаем значительно более общего понятия о синхронизации как согласованного во времени функционирования двух или нескольких объектов. Соответствующее математическое определение такого более общего (энциклопедического) понятия о синхронизации предложено в публикациях [11, 12], а также в [5] (2-е изд.). Обзор ситуации, относящейся к этому более широкому понятию, приведен в [4].

Как и в случае частотной синхронизации, в общем случае термин “синхронизация” допускает двойственное толкование — и как явление (в этом случае уместно говорить о самосинхронизации), так и действие по обеспечению нужного синхронного движения (когда речь идет об управляемой (принудительной) синхронизации).

Открытая Христианом Гюйгенсом во второй половине XVII-го столетия синхронизация маятниковых часов в дальнейшем была обнаружена при колебаниях камертонов и органичных труб. Были известны также целочисленные соотношения в орбитальных движениях небесных тел. Толчком к взрывному интересу к синхронизации и появлению значительного числа исследований послужило обнаружение в 1947 г. в институте Механобр (Ленинград) явления самосинхронизации неуравновешенных роторов (механических вибровозбудителей). Оно стало основой создания нового класса серийно выпускаемых вибрационных машин.

С одной стороны, синхронизация является даром природы, поскольку лежит в основе многочисленных полезных приложений. Однако с другой стороны, она может приводить к вредным и опасным последствиям (неуравновешенные машины на общем фундаменте, синхронизация при движении многих людей по мостам и перекрытиям).

Коллективы ученых, занимающиеся проблемами синхронизации, существуют не только в России, но и в Германии, Испании, Китае, Литве, Нидерландах, Польше, Сербии, США, Турции, Украине, Франции, Японии. Опубликовано и продолжает публиковаться большое число статей, содержащих

термин “синхронизация”. При этом наблюдается определенное различие в используемой терминологии. Появился также ряд книг по синхронизации, каждая из которых, однако, естественным образом дает несколько одностороннее представление о проблеме в соответствии с научными интересами авторов. Необходимо отметить, что отдельные исследователи работают изолированно, повторяя известные результаты без надлежащих ссылок.

К настоящему времени возникло понимание всеобщности синхронизации как физического явления, свойственного не только механическим, но и электрическим, химическим, биологическим и даже социальным объектам. Оно свойственно маятниковым часам, органным трубам, небесным телам, электрическим и квантовым генераторам, возбудителям механических колебаний, лопаткам турбомашин, химическим объектам, сообществам клеток и другим элементам живых организмов, живым организмам в коллективах. Человеческий организм – средоточие огромного числа ритмов, многие из которых синхронизированы. В частности, это относится к ритмам работы легких и сердца. Ряд патологий связан именно с нарушением синхронизации их ритмов.

Таким образом, в настоящее время несомненна универсальность явления синхронизации макроскопических объектов. Относительно квантовых систем известны лишь отдельные случаи использования синхронизации.

3. Некоторые актуальные нерешенные проблемы теории частотной синхронизации

1. Общие вопросы теории.

а) Исследование эффективных способов повышения робастности требуемых режимов самосинхронизации и подавления нежелательных режимов.

б) Исследование подавления или использования колебаний объектов с кратными по отношению к частоте синхронного движения частотами. Такие колебания сопровождают синхронные движения объектов со средними частотами колебаний или вращений.

в) Исследование самосинхронизации сложных объектов, описываемых системой со многими степенями свободы или с распределенными параметрами.

2. Продолжение исследований явлений синхронизации в биологии, физиологии, медицине (в частности, гипотеза Винера о механизме роста раковых клеток, распространение инфекций, эпидемии).

3. Исследование явлений синхронизации в экономике (теория кризисов).

4. Исследование синхронизации в поведении коллективов и групп людей, животных (например, поведение толпы, массовый психоз, полет птиц и плавание рыб).

5. Изучение возможной роли синхронизации в так называемых паранормальных явлениях (телепатия и другие).

6. Роль явлений синхронизации в микромире (см. пп. 4 и 5).

4. О некоторых явлениях синхронизации в микромире и их использовании

Упомянем некоторые известные приложения синхронизации в квантовых системах:

1. Синхронизация квантовых генераторов [13, 14] (см. также [15–18]);

2. Синхронизация мод при генерации лазерных импульсов сверхкороткой длительности и высокой мощности [19];
3. Синхронизация в лазерах [20];
4. Синхронизация контактов Джозефсона [21].

Под контактом Джозефсона понимается тонкий слой изолятора, разделяющего два сверхпроводника. Под эффектом Джозефсона понимают квантовый эффект, определяющий закономерность протекания сверхпроводящего тока через такой контакт. Оказалось, что динамика контакта Джозефсона при определенных условиях описывается уравнением движения неуравновешенного ротора (маятника, “ротатора”). В связи с этим к проблеме самосинхронизации контактов Джозефсона применимы результаты теории самосинхронизации вибровозбудителей [5, 12, 22–24].

5. О возможной фундаментальной роли синхронизации в микромире

При рассмотрении данного вопроса обращают на себя внимание следующие результаты теории частотной синхронизации:

1. Колебательные или вращательные движения свойственны всем фундаментальным объектам микромира, а явления синхронизации имеют место везде, где встречаются колебания и вращения [5, 24];

2. Устойчивые синхронные движения так называемых орбитальных систем квантованы по энергиям и частотам. Эти движения обладают ярко выраженными экстремальными свойствами — они отвечают максимальным или минимальным значениям функций, имеющих четкий физический смысл [5, 25] (см. также [26–28]);

Этот результат соответствует мысли Н.Г. Четаева об устойчивости “элитных” движений динамических систем. Н.Г. Четаеву принадлежит также высказывание о том, что такое фундаментальное понятие как устойчивость движения должно находить отражение в законах природы [29, 30] (см. также [31]);

3. Движение системы при самосинхронизации может быть весьма сложным, практически неотличимым от хаотического. Это относится, в частности, к случаю самосинхронизации нескольких одинаковых или почти одинаковых объектов. В этом случае в ограниченной области фазового пространства существует большое число устойчивых в малом синхронных движений с различным набором фаз, причем каждому такому движению соответствует малая область притяжения. В результате движение системы воспринимается как хаотическое ([5] – 2-е изд., [32]).

К настоящему времени очевидно всеобщее фундаментальное значение явлений синхронизации макроскопических динамических объектов самой разной природы.

Вопрос о фундаментальной роли самосинхронизации в микромире только начинает обсуждаться. Ему посвящено сравнительно небольшое число публикаций, частично, на уровне гипотез [5, 33–36]. К этой категории относятся и разделы 4 и 5 настоящей статьи.

6. Играет ли Бог в кости?

Приведенные выше соображения наводят на мысль — не стоит ли вновь рассмотреть возможность единого детерминистического описания явлений макро- и микромира, т.е. к мысли Эйнштейна, что “Бог не играет в кости” (“God does not play dice”).

Представляется, что определенную надежду на успех такой попытки дают рассмотренные выше результаты теории самосинхронизации, а также наличие достижений нелинейной динамики.

Быть может, дело не в различных законах, а в том, что в одних случаях целесообразно моделировать явления как детерминированные, а в других вследствие сложности — как случайные?

Разумеется, речь идет о принципиальной возможности такого единого описания, а не о целесообразном способе моделирования. Примером является та же игральная кость: каждый ее бросок описывается законами Ньютона, но результаты бросания целесообразно описывать в вероятностной форме.

7. Заключение

Не вызывает сомнения, что частотная самосинхронизация — “притяжение частот” представляет собой универсальное явление, характерное для всех процессов, в которых встречаются колебания или вращения. Захватывание может рассматриваться как предельный частный случай самосинхронизации. Вместе с тем как само явление самосинхронизации, так и его отдельные аспекты еще требуют размышления и исследования. Некоторые актуальные проблемы остаются нерешенными. Это относится, в частности, к вопросу о роли самосинхронизации в микромире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртовник А.С., Неймарк Ю.И. О синхронизации динамических систем // Прикладная математика и механика. 1974. Т. 38. Вып. 5. С. 749–758.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.; изд. 2-е, дополн. М.: URSS, 2009.
Neimark Yu.I., Landa P.S. Stochastic and Chaotic Oscillations. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1992.
3. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow // J. of the Atmos. Sci. 1963. V. 20. No. 2. P. 130–141.
4. Strogatz S.H. SYNC: how order emerges from chaos in the universe, nature, and daily life. N.Y.: Penguin Group, 2004.
Строгац Стивен. Ритм Вселенной. Как из хаоса возникает порядок в природе и в повседневной жизни. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017.
5. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
Blekhman I.I. Synchronization in Science and Technology. N.Y.: ASME Press, 1988.; 2-е рус. изд., доп.: М.: URSS, Ленанд, 2015.
6. Блехман И.И. Самосинхронизация вибраторов некоторых вибрационных машин // Инженерный сб. 1953. Т. 16. С. 49–72.

7. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. М.: Наука, 1964.
8. Краснопольская Т.З., Швец А.Ю. Регулярная и хаотическая динамика систем с ограниченным возбуждением. М.-Ижевск: НИИ "Регулярная хаотическая динамика", 2008.
9. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматлит, 1959.
10. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971.
11. Blekhtman I.I., Fradkov A.L., Nijmeier H., Pogromsky A.Yn. On self-synchronization and controlled synchronization // J. Syst. Control Lett. 1997. No. 31. P. 299–305.
12. Selected Topics in Vibrational Mechanics (Ser. on Stability, Vibration and Control of Systems: Series A, V. 11). 2004. N.J.: World Scientific.
13. Климонтович Ю.Л. Квантовые генераторы света и нелинейная оптика. М.: Просвещение, 1966.
14. Манешин П.К., Хохлов Р.В. Взаимная синхронизация двух молекулярных генераторов при малой связи // Науч. докл. высш. шк. Сер. Радиотехника и электроника. 1958. № 3. С. 74–83.
15. Ораевский А.Н. Молекулярные генераторы. М.: Наука, 1964.
16. Любимов Г.П., Хохлов Р.В. О поляризации молекулярного пучка переменным полем с изменяющейся амплитудой и фазой // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 6. № 12. С. 1396–1402.
17. Maiman T. Stimulated Optical Radiation in Ruby // Nature. 1960. Vol. 187. Iss. 4736. P. 493–494. <https://doi.org/10.1038/187493a0>.
18. Миловский Н.Д., Ястребова Г.В. О работе кольцевого ОКГ, синхронизированного внешней силой // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 11. С. 2333–2339.
19. Прохоров А.М., Анисимов С.И., Паншин П.П. Лазерный термоядерный синтез // Успехи физич. наук. 1976. Т. 119. Вып. 401. С. 401–424.
20. Завтрак С.Т., Волков И.В. Сазер (Sound Amplification by stimulated emission of radiation) // Журн. технич. физики. 1997. Т. 67. № 4. С. 92–100.
21. Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. М.: Изд-во МГУ, 1978.
22. Barone A., Paterno G. Physics and applications of the Josephson effect. N.Y.: Wiley, 1982.
23. Watanabe S., Strogatz S.H. Constants of Motion for Superconducting Josephson Arrays // Physica D. 1994. V. 74. No. 3–4. P. 197–253.
24. Пиковский А., Розенблум М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization. A universal concept in non-linear science. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2001.
25. Белецкий В.В., Хентов А.А. Резонансные вращения небесных тел. Нижний Новгород: Нижегород. гуманитарный центр, 1995.
26. Чечельницкий А.М. Экстремальность, устойчивость, резонансность в астродинамике и космонавтике. М.: Машиностроение, 1980.
27. Чечельницкий А.М. Волновая структура, квантование, мегаспектроскопия Солнечной системы // Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства. М.: Машиностроение, 1986.

28. Молчанов А.М. О резонансной структуре Солнечной системы // Современные проблемы небесной механики и астродинамики. М.: Наука, 1973.
29. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. 3-е изд. М.: Гостехиздат, 1955.
30. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
31. Блехман И.И., Вайсберг Л.А. Адаптивные свойства динамических объектов // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2006. № 3. С. 23–29.
32. Blekhtan I.I. Multimode Character of Dynamical Systems as a Cause of Their Complex (“Chaotic”) Behaviour // Proc. 4th Int. Conf. on Computation Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2013). Cos Island, Greece, June, 2013.
33. Блехман И.И., Довгеля Е.Г., Дрогуш С.Я., Кремер Е.Б., Сазонов Г.Т., Семешкин С.С. Гипотеза о механизме квантования частот обращения тел в орбитальных системах. Ассоциация авторов научных открытий. № А-043 от 15.02.1995.
34. Губарь Ю.Н. Резонансные соотношения между комптоновскими частотами и соизмеримость масс элементарных частиц. М.: МГУ, НИИ Ядерной физики, 1983.
35. Гареев Ф.А. Геометрическое квантование микро- и макросистем. Планетарно-волновая структура адронных резонансов // Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996.
36. Рабинович Б.И. Суперэлитные плазменные кольца и орбиты планет и спутников, изоморфные орбиты электронов в водородоподобных атомах. М.: Институт космич. исследований, 2005.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.Т. Поляком.

Поступила в редакцию 23.07.2019

После доработки 24.09.2019

Принята к публикации 30.01.2020