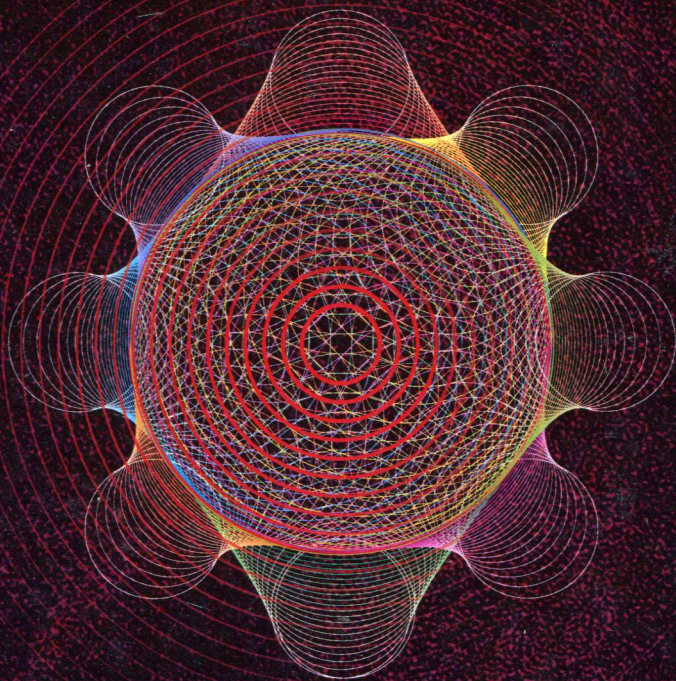


И. И. Блехман

# СИНХРОНИЗАЦИЯ

В ПРИРОДЕ  
И ТЕХНИКЕ



URSS

**И. И. Блехман**

# **СИНХРОНИЗАЦИЯ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ**

Издание второе, дополненное



**URSS**  
**МОСКВА**

*Исследование осуществлено при частичной поддержке  
Российского научного фонда (проект № 14–19–01190)*

**Блехман Илья Израилевич**

**Синхронизация в природе и технике.** Изд. 2-е, доп. — М.: ЛЕНАНД,  
2015. — 440 с.

Синхронизация — это согласованное во времени движение двух или нескольких объектов, без нее невозможно функционирование многих технических систем.

Наиболее интересна и до сих пор окончательно не разгадана по своей природе частотная («тойгенсова») самосинхронизация: объекты самой различной природы вырабатывают единый ритм совместного движения, несмотря на различие индивидуальных ритмов и на подчас весьма слабые взаимные связи. Синхронизируются маятниковые часы, органы трубы, небесные тела, электрические, электромагнитные и квантовые генераторы, возбудители механических колебаний в вибрационных устройствах, лопатки турбомашин, сообщества клеток и других элементов живых организмов, сами живые организмы в коллективах (жуки-светляки, птицы и рыбы в стаях, аплодирующие или марширующие люди). Самосинхронизация носит, таким образом, универсальный характер, она является одним из важных случаев явления самоорганизации.

Тенденция к синхронизации находит свое отражение в свойстве нелинейных дифференциальных уравнений определенного вида допускать устойчивые периодические решения.

В книге описаны наиболее яркие проявления самосинхронизации и ее различные приложения. Дана общая формулировка задач, кратко (в основном без доказательств) изложен рабочий математический аппарат, приведены главные положения и результаты теории синхронизации, указаны некоторые нерешенные проблемы.

Второе издание книги существенно дополнено кратким изложением новых результатов, в частности, общим определением синхронизации, а также соответствующими литературными ссылками.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, сталкивающихся с проблемами нелинейных колебаний, в частности, математиков, механиков, физиков, химиков, медиков, биологов. Она может быть использована аспирантами и студентами соответствующих специальностей.

Формат 60×90/16. Печ. л. 27,5. Зак. № ИП-38.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-2122-3

© ЛЕНАНД, 2015

14948 ID 199541



9 785971 021223



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию.....	6
Предисловие к первому изданию.....	8
Из предисловия к книге «Синхронизация динамических систем» .....	12
Введение .....	15
§ 1. Явления синхронизации в природе и технике. Краткий обзор истории развития и современного состояния проблемы .....	15
§ 2. Общий взгляд на синхронизацию. Что понимать под тенденцией к синхронизации? .....	25
§ 3. Основные закономерности синхронизации .....	26
<b>ЧАСТЬ ПЕРВАЯ</b>	
<b>Общая постановка задач и характеристика основного математического аппарата теории синхронизации динамических систем</b>	
<b>Глава 1. Общая постановка задач о синхронизации и их основные особенности .....</b>	<b>29</b>
§ 1. Постановка задач о синхронизации; основные термины и определения .....	29
§ 2. Синхронизация слабо связанных объектов. Задачи о синхронизации, допускающие использование методов малого параметра.....	37
<b>Глава 2. Общая характеристика математического аппарата теории синхронизации слабо связанных динамических объектов .....</b>	<b>41</b>
§ 1. Методы малого параметра Пуанкаре и Ляпунова в задачах о синхронизации слабо связанных объектов .....	41
§ 2. О результативных соотношениях теории синхронизации слабо связанных объектов. Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений .....	43
§ 3. О других математических методах решения задач о синхронизации слабо связанных объектов.....	48
<b>ЧАСТЬ ВТОРАЯ</b>	
<b>Синхронизация технических и природных объектов</b>	
<b>Глава 3. Синхронизация механических вибровозбудителей .....</b>	<b>49</b>
§ 1. О вибрационных машинах и устройствах.....	49
§ 2. Проблема синхронизация и фазировки вращения роторов механических вибровозбудителей.....	50



§ 3. Обнаружение, исследование и практическое использование явления самосинхронизации механических вибровозбудителей.....	52
§ 4. Самосинхронизация дебалансных вибровозбудителей в простейшей колебательной системе (основные соотношения) .....	54
§ 5. Общий анализ и различные формы записи основных соотношений задачи о самосинхронизации вибровозбудителей. Вибрационные моменты, парциальные угловые скорости.....	62
§ 6. Некоторые важные частные случаи .....	69
1. Случай двух вибровозбудителей. О явлении вибрационного поддержания вращения (69). 2. Случай почти одинаковых вибровозбудителей (73).	
§ 7. Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений и тенденция вибровозбудителей и синхронизации. Некоторые существенные следствия.....	76
§ 8. Обобщения задачи о синхронизации вибровозбудителей .....	78
1. Описание системы и главные предположения (73). 2. Основные резульативные соотношения (82). 3. Случай квазилинейной колебательной системы. Выражения вибрационных моментов через гармонические коэффициенты влияния (88). 4. Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений и тенденция вибровозбудителей к синхронизации (93). 5. Синхронизация вибровозбудителей на упруго опертом плоско колеблющемся твердом теле (95). 6. Режимы установления синхронных движений вибровозбудителей (100). 7. Другие обобщения задачи о синхронизации вибровозбудителей (краткий обзор исследований) (102).	
§ 9. Стабильность фазировки вращения роторов самосинхронизирующихся вибровозбудителей. Об относительной силе вибрационной связи между возбудителями .....	103
1. О понятии стабильности фазировки при самосинхронизации вибровозбудителей (103). 2. Случай симметричной схемы с двумя возбудителями (104). 3. Нормирование и способы повышения стабильности (108). 4. Об относительной силе вибрационной связи между возбудителями (110). 5. Об исследовании стабильности в более сложных случаях (110).	
§ 10. Практическая методика исследования устройств с самосинхронизирующимися вибровозбудителями; примеры, сводка некоторых результатов.....	111
1. О методике исследования устройств с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями (111). 2. Примеры исследования самосинхронизации вибровозбудителей (114). 3. Сводка условий устойчивости важнейших синхронных движений вибровозбудителей в некоторых колебательных системах (117)	
§ 11. О синтезе вибрационных машин с несколькими механическими возбудителями колебаний.....	134
1. Проблема создания заданного вибрационного поля и задачи синтеза системы возбуждения (134). 2. О синтезе системы возбуждения	

с использованием явления самосинхронизации. Два способа изменения устойчивой фазировки возбудителей (137). 3. О способах принудительной синхронизации и о синтезе соответствующих устройств (140).	
§ 12. Вибрационное поддержание и захватывание вращения неуравновешенного ротора. Выражения для модуля вибрационного момента и эффективной амплитуды колебаний оси ротора .....	142
§ 13. Экспериментальное подтверждение и исследование эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и вибрационного поддержания вращения неуравновешенного ротора.....	150
§ 14. Основные закономерности и парадоксы самосинхронизации вибровозбудителей.....	156
1. Тенденция дебалансных вибровозбудителей к синхронизации, вибрационное поддержание вращения (156). 2. Эффект усреднения парциальных скоростей (157). 3. Эффект передачи больших мощностей (157). 4. Установление определенных соотношений между фазами движения инерционных элементов возбудителей (158). 5. Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений (158). 6. Эффект взаимного уравнивания (принцип минимума средней кинетической энергии) при установке возбудителей на мягко амортизированном твердом теле (обобщенный принцип Лавала) (158). 7. Парадокс неработающих связей (159). 8. Зависимость характера устойчивой фазировки возбудителей от числа степеней свободы системы связи (160). 9. Парадокс принуждения (160). 10. Зависимость характера устойчивой фазировки от числа возбудителей (160). 11. Ухудшение условий самосинхронизации и вибрационного поддержания вращения для кратко-синхронных режимов (160).	
§ 15. Практическое использование явления самосинхронизации вибровозбудителей и эффекта вибрационного поддержания вращения.....	161
1. Поедание нового класса вибрационных машин и устройств (161). 2. Приложение к проектированию групповых фундаментов под неуравновешенные машины 169).	
<b>Глава 4. Синхронизация объектов, родственных механическим вибровозбудителям .....</b>	<b>172</b>
§ 1 Предварительные замечания .....	172
§ 2. Автобалансир .....	172
§ 3. Ротор с маятниковыми подвесками.....	180
§ 4. Вращающийся гибкий вал с неуравновешенными дисками .....	186
§ 5. Сепараторы подшипников качения.....	193
<b>Глава 5. Синхронизация объектов типа маятниковых часов .....</b>	<b>201</b>
§ 1. Взаимная синхронизация маятниковых часов на упруго опертой платформе (задача Гюйгенса).....	201
§ 2. Случай почти одинаковых часов.....	207

§ 3. Некоторые основные закономерности самосинхронизации маятниковых часов, их отличие от закономерностей самосинхронизации неуравновешенных роторов (вибровозбудителей).....	210
§ 4. О синхронизации колебаний лопаток турбомашин.....	211
<b>Глава 6. Синхронизация в электротехнике, радиотехнике и радиофизике.....</b>	<b>212</b>
§ 1. Синхронизация при параллельной работе электрических машин.....	212
§ 2. Синхронизации ламповых и полупроводниковых генераторов .....	216
1. Краткий обзор развития и состояния проблемы (216). 2. Генераторы томсоновского типа (квазилинейные автогенераторы Ван-дер-Поля) (218). 3. Релаксационные генераторы (222). 4. Приложения синхронизации генераторов. О системах фазовой автоподстройки частоты (223).	
§ 3. Синхронизация квантовых генераторов .....	224
§ 4. Синхронизация в распределенных системах и ее приложения .....	225
<b>Глава 7. Явления синхронизации при движении небесных тел.....</b>	<b>228</b>
§ 1. О замечательных целочисленных соотношениях между периодами обращения и вращении небесных тел и их истолковании с позиций теории синхронизации.....	228
§ 2. Потенциальная функция и интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений для небесномеханических орбитальных систем.....	230
§ 3. Случай плоской точечной орбитальной системы. Сопоставление результатов с данными некоторых астрономических наблюдений и вычислений.....	233
§ 4. О тенденции к синхронизации в рассмотренных системах. Роль диссипативных сил.....	241
§ 5. О гипотезе А. М. Молчанова .....	242
<b>Глава 8. Явления синхронизации в химии, биологии и медицине .....</b>	<b>245</b>
§ 1. Ритмы и цикличность в природе .....	245
§ 2. Явления синхронизации в химических, биохимических и биологических системах.....	247
§ 3. Некоторые нерешенные проблемы и относящиеся к ним гипотезы (о телепатии и проблеме рака).....	254
§ 4. Заключение.....	259
<b>Глава 9. Синхронизация и некоторые физические проблемы .....</b>	<b>260</b>
§ 1. Стохастичность и синхронизация — два полярно противоположных вида поведения динамических систем.....	260
§ 2. О возможной роли явлений синхронизации в микромире.....	261

**ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ****Математический аппарат и основные результаты общей теории синхронизации слабо связанных динамических объектов**

<b>Глава 10. Теоремы о существовании и устойчивости периодических и синхронных решений дифференциальных уравнений, содержащих малый параметр (методы Пуанкаре и Ляпунова).....</b>	<b>263</b>
§ 1. Предварительные замечания. О методах Пуанкаре и Ляпунова в теории периодических решений .....	263
§ 2. Квазилинейные неавтономные системы .....	268
§ 3. Квазилинейные автономные системы.....	272
§ 4. Неавтономные системы, близкие к произвольным нелинейным.....	274
§ 5. Автономные системы, близкие к произвольным нелинейным .....	276
§ 6. Системы, близкие к произвольным нелинейным в случае квазипериодического семейства порождающих решений .....	278
§ 7. Дополнительные замечания к теоремам §§ 2–6.....	283
§ 8. Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) периодических и синхронных движений .....	286
§ 9. О наличии устойчивых периодических или синхронных движений (тенденции к синхронизации) в случае периодической потенциальной функции и в некоторых других случаях .....	292
<b>Глава 11. О некоторых других методах решения задач о синхронизации слабо связанных динамических объектов .....</b>	<b>296</b>
§ 1. Предварительные замечания .....	296
§ 2. Асимптотические методы и принцип усреднения.....	296
§ 3. Метод прямого разделения движения .....	299
§ 4. Метод точечных отображений .....	304
§ 5. Стробоскопический метод Н. Минорского.....	307
§ 6. Вариационный метод А. И. Лурье.....	309
<b>Глава 12. Синхронизация некоторых основных классов динамических объектов.....</b>	<b>311</b>
§ 1. Предварительные замечания .....	311
§ 2. Общий случай слабо связанных объектов 1. Задача о внешней синхронизации (311). 2. Задача о внутренней синхронизации (314) .....	311
§ 3. Квазилинейные объекты с одной степенью свободы (квазилинейные осцилляторы).....	314



§ 4. Системы с почти равномерными вращательными движениями.....	316
§ 5. Квазиконсервативные объекты .....	320
§ 6. Орбитальные системы.....	327
1. Определение орбитальных систем, свободные и несвободные (каркасные) орбитальные системы, их синхронизация (327).	
2. Несвободная орбитальная система со слабо взаимодействующими простейшими несомыми телами. Основное вариационное соотношение и пример его использования (329).	
§ 7. О тенденции к синхронизации в рассмотренных динамических системах.....	335
<b>Литература к первому изданию.....</b>	<b>336</b>