

УДК 517.938

ТАНЦУЮЩИЕ МОСТЫ И АВАРИЯ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Белых Владимир Николаевич¹, профессор, д. ф.-м. н., заведующий кафедрой математики
e-mail: belykh.vn@vsuwt.ru

Меньшенина Алевтина Владимировна¹, старший преподаватель кафедры математики
e-mail: alya112@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе предлагается объяснение причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, состоящее в том, что при образовании зазоров у шпилек крепления все 10 турбин начинают взаимодействовать между собой через связывающее полотно бетонного основания. В этом случае задача об аварии становится похожей на задачу потери устойчивости подвесных мостов при движении по ним пешеходов.

Ключевые слова: динамическая система, синхронизация, танцующие мосты, авария на СШГЭС.

WOBBLY BRIDGES AND ACCIDENT AT THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP

Vladimir N. Belykh¹, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Mathematics

e-mail: belykh.vn@vsuwt.ru

Alevtina V. Menshenina¹, Senior lecturer of Department of Mathematics

e-mail: alya112@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper proposes a hypothesis for the cause of the accident at the Sayano-Shushenskaya HPP. It consists in the fact that all 10 turbines begin to interact with each other by means of a connecting web (the floor of the engine room of the HPP) due to mounting pins gaps. In this case, the problem of an accident becomes similar to the problem of losing the stability of bridges when pedestrians move along them.

Keywords: dynamical system, synchronization, wobbly bridge, accident at the SSHPP.

В середине 17 века Христиан Гюйгенс открыл удивительное явление. Он наблюдал за парой одинаковых часов, подвешенных на общей балке, размещенной на двух опорах (рисунок 1). Гюйгенс заметил, что часы, вначале имевшие разный ход, через некоторый промежуток времени вдруг синхронизировались в противофазе. В случае искусственного нарушения этой согласованности синхронизация в противофазе снова восстанавливалась

спустя некоторое время. Гюйгенс высказал предположение [1], что синхронизация часов наступает вследствие незаметных малых колебаний балки, на которой подвешены часы.

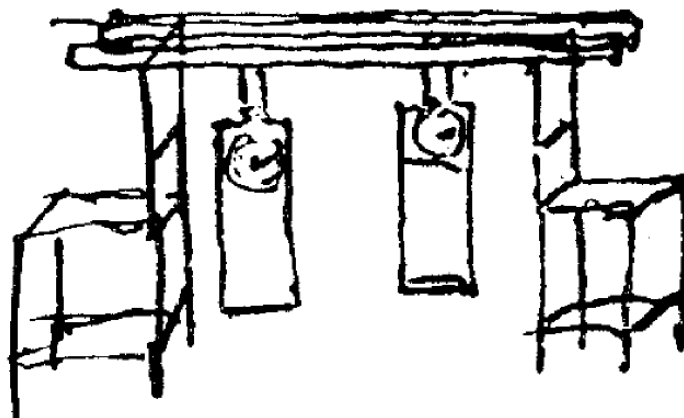


Рисунок 1 – Рисунок Х. Гюйгенса, иллюстрирующий эксперимент с часами

Эффект синхронизации также наблюдался в различных физических, химических, биологических системах. Более подробно с явлением синхронизации можно ознакомиться, например, в [2]. В работе [2] также изучен эксперимент Гюйгенса с большим количеством маятников. Показано, что в такой системе может устанавливаться два режима. Первый режим, при котором маятники синхронизируются по частоте в противофазе, в этом случае колебания маятников попарно компенсируют друг друга, и балка остается неподвижной. При втором режиме происходит синхронизация осцилляторов и по частоте, и по фазе. В этом случае балка теряет устойчивость, и амплитуда колебаний балки увеличивается при возрастании количества осцилляторов. Переход от первого режима ко второму осуществляется в результате сложной бифуркации, приводящей к неожиданному возникновению больших колебаний балки.

Задача синхронизации маятников продолжает интересовать исследователей и в настоящее время, например [3, 4], поскольку имеет большое прикладное значение, в том числе для объяснения и устранения причин различных аварий. Так в [3] рассмотрена задача управляемой синхронизации двух маятников, подвешенных на общей опоре, и предлагается способ синхронизации, при котором удастся избежать колебаний опорной балки. В работе [4] с использованием модели перевернутого маятника дано общепризнанное объяснение возникновения больших колебаний моста Миллениум (London Millennium Footbridge) в Лондоне в 2000 году (на открытии моста при увеличении количества пешеходов, следовавших по нему, мост начал раскачиваться). В [4] показано, что и в данном случае возникает явление синхронизации, впервые открытое Гюйгенсом, которое позволяет объяснить причины возникновения колебаний не только моста Миллениум, но и других «танцующих» мостов [5].

Цель настоящей работы показать, что описанное явление внезапного возникновения больших колебаний опоры, на которой размещены осцилляторы, может служить объяснением аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.

Саяно-Шушенская ГЭС – крупнейшая по мощности гидроэлектростанция России. В ее машинном зале расположено десять гигантских гидроагрегатов мощностью 640 МВт каждый с радиально-осевыми турбинами, работающими при напоре столба воды высотой 194 м. Номинальная частота вращения гидротурбины 142,8 об/мин, а общая масса оборудования одной гидротурбины составляет 1440 т. Строительство СШГЭС началось в 1963 году и продолжалось с постепенным вводом в работу гидроагрегатов до начала 2000-х годов.

В августе 2009 г. на СШГЭС произошла одна из крупнейших техногенных аварий на гидроэнергетическом объекте России. В результате аварии произошел внезапный срыв крышки турбины гидроагрегата №2 и разгерметизация водоподводящего тракта, что привело к огромным разрушениям всей станции. Официальная причина аварии – разрушение шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата вследствие вибрации и усталостных повреждений металлоконструкций. Однако, многие специалисты считают (см. [6, 7] и др.), что на изолированной от других турбине такая авария произойти не могла.

При проектировании гидроэлектростанции предполагалось, что валы гидроагрегатов жестко закреплены и неподвижны. Движение гидроагрегата можно упрощенно рассматривать как движение волчка с закрепленной сверху осью. Место крепления этой оси – крышка турбины, которая совершает малые колебания. Эти вибрации можно считать автоколебаниями, вызванными вращением турбины.

Все 10 турбин имеют общее железобетонное основание, расположенное под полом машинного зала и имеющее массу, значительно превышающую массу турбин. Однако, оно может совершать незначительные горизонтальные колебания. В связи с этим всю огромную конструкцию основания (балки) и крышек турбин (осцилляторов) можно считать взаимосвязанной.

Движение системы все турбины - основание может быть описано следующей системой уравнений:

$$M\ddot{y} + h\dot{y} + ky = \sum_{i=1}^{10} f_i$$

$$m_i\ddot{x}_i = -f_i - m_i\ddot{y}, i = \overline{1, 10}$$

Здесь первое уравнение моделирует движение основания, которое имеет массу M , вдоль направления пола машинного зала; второе уравнение – движение каждой из турбин в том же направлении; f_i – сила взаимодействия турбины и основания, m_i – эффективная масса вращающихся частей i -го гидроагрегата, отражающая момент инерции турбины и ротора генератора.

Каждая турбина совершает небольшие колебания, но за счет их огромной массы и скорости, а также связанности через бетонное основание происходит синхронизация их движения под «управлением» основания. Наблюдается ситуация аналогичная [4] возникающей при изучении колебаний моста при движении по нему пешеходов. Воздействие каждого пешехода на мост незначительное, но при увеличении числа пешеходов до критического значения мост начинает колебаться, и пешеходы, вынужденные подстраиваться под движение моста, начинают двигаться синхронно, раскачивая мост еще сильнее. В случае СШГЭС изменение параметров системы, в первую очередь режимов работы гидроагрегатов, могло привести к недопустимому увеличению амплитуд колебаний крышек турбин и общего основания в результате бифуркации перехода от равновесия к синхронным колебаниям, как это наблюдалось в часах Гюйгенса и при внезапном возникновении колебаний большой амплитуды моста Миллениум в Лондоне.

Список литературы:

1. Гюйгенс Х. Три мемуара по механике / Пер., ред. и прим. проф. К.К. Баумгарта. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 379 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 352 с.



3. Pogromsky A.Yu., Belykh V.N., Nijmeijer, H. Controlled synchronization of pendula // Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Maui, Hawaii USA, December. 2003. - P. 4381-4386.
4. Igor Belykh, Russel Jeter, Vladimir Belykh. Foot force models of crowd dynamics on a wobbly bridge // Science Advances. – 2017. – Vol. 3(11). – URL: https://www.researchgate.net/publication/309283697_Foot_force_models_of_crowd_dynamics_on_a_wobbly_bridge (дата обращения: 04.06.2026)
5. Белых И.В., Дейли К.М., Белых В.Н. Возникновение неустойчивости в системе пешеход–мост: роль частотных соотношений // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 10. С. 777–786.
6. Кудрявый В.В. Системные причины аварий // Гидротехническое строительство. – 2013. – №. 2. – С. 29-37.
7. Рассохин Г.В. Саяно-Шушенская ГЭС, август девятого: как это было. – URL: <https://www.plotina.net/sshges-rassokhin-11/> (дата обращения: 04.06.2026)

