

09

Когерентный резонанс в замкнутой цепочке ждущих мультивибраторов

© А.П. Никитин

Саратовский государственный университет,
E-mail: nikitin@chaos.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2001 г.

Показано, что причиной роста когерентности стохастических колебаний ждущих мультивибраторов могут быть однонаправленные циклические связи между ними. Кроме того, существует оптимальное значение эффективного шумового напряжения, при котором колебания мультивибраторов наиболее когерентны.

Возрастание и последующий спад когерентности колебаний стохастической системы при увеличении ее зашумленности — явление нетривиальное [1]. Именно поэтому когерентный резонанс привлекает исследователей. Он был обнаружен и изучен как в изолированных [1–3], так и во взаимодействующих моделях нейронов [4–6]. При рассмотрении связанных систем, как правило, в первую очередь изучаются режимы синхронизации колебаний [5–6], поскольку предполагается, что синхронизация и усреднение статистически независимых флуктуаций отдельных осцилляторов ведет к увеличению когерентности совокупных колебаний всего ансамбля [6–7]. В настоящей работе будет показано, что альтернативной причиной роста когерентности колебаний могут быть однонаправленные циклические связи между элементами системы, причем условие статистической независимости флуктуаций не является обязательным.

Широко распространенными радиотехническими устройствами, которые, подобно нейронам, реагируют электрическими импульсами на возмущения, являются ждущие мультивибраторы [8–9]. Следует отметить, что возбуждение как нейронов [10], так и мультивибраторов происходит лишь в том случае, если возмущение превышает некоторую пороговую величину. Таким образом, ждущие мультивибраторы являются электронными аналогами нейронов, и с их помощью можно моделировать стохастическую динамику нейронных цепей [4].

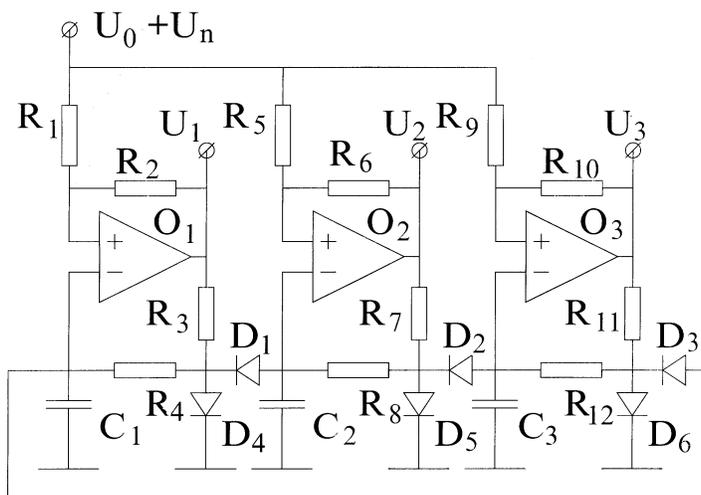


Рис. 1. Схема цепочки мультивибраторов. O_1, O_2 и O_3 — операционные усилители К140УД7. Диоды D_1-D_6 — Д223А. Резисторы R_1, R_5, R_9 — $16\text{ k}\Omega$, R_2, R_6, R_{10} — $75\text{ k}\Omega$, R_3, R_7, R_{11} — $1.1\text{ k}\Omega$, R_4, R_8, R_{12} — $30\text{ k}\Omega$. Конденсаторы C_1, C_2, C_3 — $0.033\text{ }\mu\text{F}$. U_0 — напряжение смещения, необходимое для введения мультивибраторов в ждущий режим. U_1, U_2, U_3 — выходные напряжения мультивибраторов.

На рис. 1 представлена схема цепи однонаправленно связанных мультивибраторов, возбуждаемых шумом. Нелинейная вольт-амперная характеристика и места включения диодов обеспечивают подавляющую однонаправленную связь между элементами цепи. Такой вид связи типичен для нейронов [10]. Широкополосное шумовое напряжение U_n , имеющее гауссовское распределение, возбуждает мультивибраторы. Случайное возбуждение одного из мультивибраторов, например первого, приводит к тому, что через диод D_1 разряжается конденсатор C_2 последующего в цепи мультивибратора. Следует отметить, что потенциал конденсатора характеризует порог возбуждения схема. Таким образом, возбуждение одного мультивибратора увеличивает порог возбуждения другого и тем самым подавляет его активность. В свою очередь спонтанное возбуждение третьего мультивибратора блокирует активность первого, а второй мультивибратор в этом случае переходит в режим релаксации,

длительность которого связана со временем, необходимым для заряда конденсатора C_1 . По окончании релаксации ждущий мультивибратор готов возбудиться. После прихода шумового всплеска, превышающего пороговое значение, второй мультивибратор возбуждается, а третий переходит в подавленное состояние и позволяет первому вступить в фазу релаксации. Таким образом, волна возбуждения пробегает от первого к третьему мультивибратору, от третьего ко второму и от второго обратно к первому. Временной интервал, за который пробегает по цепи волна, складывается из трех времен: τ_a — время перехода в возбужденное состояние, τ_b — время нахождения в возбужденном состоянии и τ_c — время релаксации.

Время τ_a определяется величинами порога возбуждения Δ_U и интенсивности шума G , причем для малых G оно подчиняется закону Аррениуса: $\langle \tau_a \rangle \sim \exp(\Delta_U/G)$, где угловые скобки обозначают среднее значение.

Время нахождения в возбужденном состоянии, т.е. длительность генерируемого мультивибратором импульса τ_b , слабо зависит от интенсивности шума G , и для малых величин G время τ_b можно считать детерминированной величиной. Оно определяется временем перезаряда конденсатора и пропорционально RC .

Для автономного ждущего мультивибратора период колебаний складывается из двух величин τ_a и τ_b . Пока интенсивность шума мала, относительная средняя ошибка периода колебаний T есть

$$R_0 = \sqrt{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} / \langle T \rangle = \sqrt{\langle \tau_a^2 \rangle - \langle \tau_a \rangle^2} / (\langle \tau_a \rangle + \tau_b),$$

где предполагается $\tau_b = \text{const}$.

Для замкнутой цепи из мультивибраторов период колебаний больше. Он включает в себя еще и время релаксации τ_c , которое, подобно τ_b , связано с перезарядом конденсатора, т.е. для малых G время τ_c является почти детерминированной величиной. Таким образом, относительная средняя ошибка периода колебаний T_c

$$R_1 = \sqrt{\langle T_c^2 \rangle - \langle T_c \rangle^2} / \langle T_c \rangle = \sqrt{\langle \tau_a^2 \rangle - \langle \tau_a \rangle^2} / (\langle \tau_a \rangle + \tau_b + \tau_c)$$

меньше для мультивибратора, который является элементом цепи, чем для мультивибратора, не охваченного связями.

Данный вывод подтверждается экспериментальными результатами, которые представлены на рис. 2, а. Приведенные на рисунке спектры

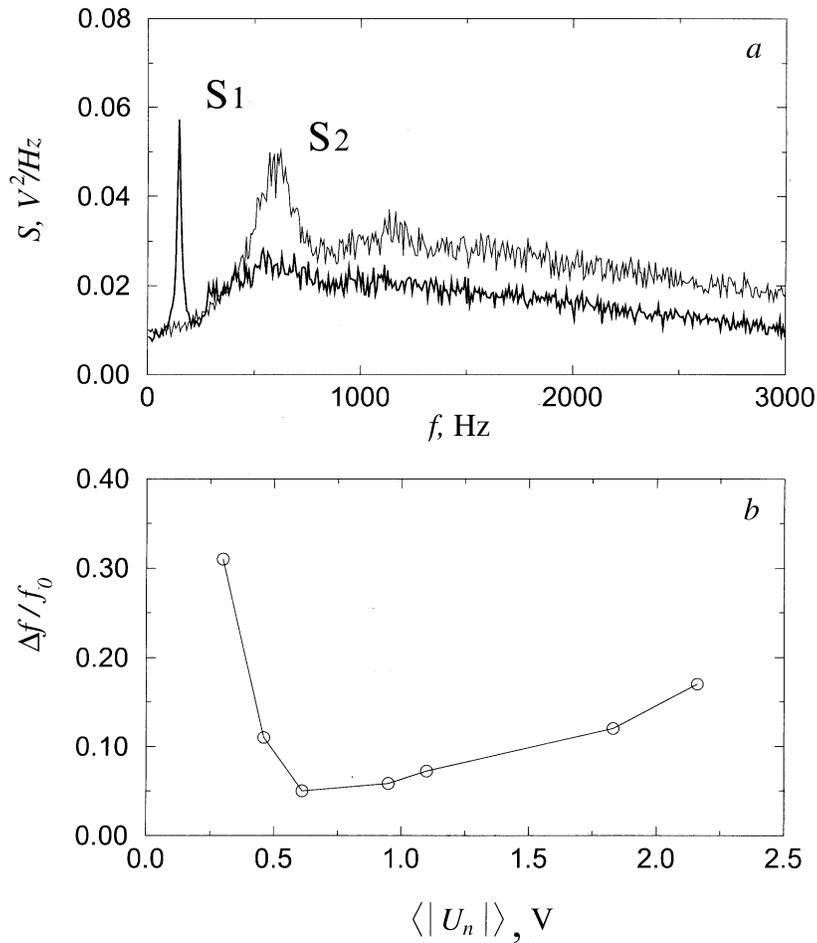


Рис. 2. *a* — спектры мощностей. S_1 — соответствуют мультивибратору, который связан с другими; S_2 — спектр автономного мультивибратора, $U_0 = 0.21 V$; эффективное шумовое напряжение $\langle |U_n| \rangle = 0.3 V$. *b* — зависимость относительной ширины спектральной линии $\Delta f/f_0$ от эффективного шумового напряжения $\langle |U_n| \rangle$. U_n — гауссовский шум с эффективной шириной спектра 50 kHz. $U_0 = 0.21 V$.

мощности показывают, что ширина основной спектральной линии меньше для мультивибратора, связанного с другими аналогичными ему, чем для мультивибратора без таких связей. Кроме того, на рис. 2, *b* показана зависимость относительной ширины спектральной линии от эффективного шумового напряжения. Хорошо видно, что зависимость является немонотонной. Существует оптимальное значение эффективного шумового напряжения, при котором ширина спектральной линии минимальна, т. е. колебания наиболее когерентны. Объяснить данное явление можно следующим образом. Пока интенсивность шума мала, увеличение G ведет к сокращению стохастической составляющей времени, т. е. τ_a , в периоде колебания. Как следствие, растет когерентность колебаний. Однако при очень больших значениях G когерентность колебаний будет падать вследствие роста стохастичности времен τ_b и τ_c , которые считать детерминированными уже нельзя.

Следует отметить, что в экспериментах все мультивибраторы были идентичны и возбуждались от единого источника шума.

Работа была выполнена в рамках проекта Научно-образовательного центра нелинейной динамики и биофизики (грант REC-006).

Список литературы

- [1] *Pikovsky A.S., Kurths J.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 775–778.
- [2] *Lindner B., Schimansky-Geier L.* // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. P. 6103–6110.
- [3] *Lindner B., Schimansky-Geier L.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 7270–7276.
- [4] *Postnov D.E., Han S.K., Yim T.G., Sosnovtseva O.V.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. R3791–R3794.
- [5] *Han S.K., Yim T.G., Postnov D.E., Sosnovtseva O.V.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 1771–1774.
- [6] *Neiman A., Schimansky-Geier L., Cornell-Bell A., Moss F.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 4896–4899.
- [7] *Hempel H., Schimansky-Geier L., Garcia-Ojalvo J.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 3713–3716.
- [8] *Петрович Н.Т., Козырев А.В.* Генерирование и преобразование электрических импульсов. М.: Сов. радио, 1954. 428 с.
- [9] *Горошков Б.И.* Радиоэлектронные устройства: Справочник. М.: Радио и связь, 1984. 400 с.
- [10] *Rosenzweig M.R., Leiman A.L., Breedlove S.M.* Biological psychology. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, 1996. 737 p.