

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПАДКОВОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ НА ВИХОДІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗАНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

*Представлено комп'ютерне моделювання системи двох зв'язаних релаксаційних RC-генераторів, пов'язаних між собою таким чином, що кожен з них впливає на тривалість та період імпульсів, що генеруються іншим. За таких умов отримується нелінійна нерівноважна система з двома ступенями вільності, в якій згідно загальних уявлень є принципово можливою хаотична динаміка, тобто непередбачувана поведінка порівняно простої динамічної системи. Виявлено, що за умови ірраціонального співвідношення між частотами коливань окремих генераторів спектр коливань має значну суцільну складову, характерну для шуму. При посиленні взаємного впливу суцільна складова спектру зростає, а вплив окремих гармонік, які відповідають частотам коливань незв'язаних генераторів, зменшується. Порівняння з результатами публікацій інших дослідників показує, що такий спектр може відповідати випадковій широтно-імпульсній модуляції, дослідження якої наразі актуальні з точки зору створення нових типів вторинних джерел живлення та систем керування електромеханічними пристроями на кшталт електродвигунів.*

*Серед інших результатів роботи слід відзначити те, що за раціонального співвідношення між частотами коливань окремих автогенераторів спостерігалися квазіперіодичні коливання практично за будь-якого рівня взаємного зв'язку. Також такі коливання спостерігалися і за ірраціонального співвідношення між частотами коливань незв'язаних генераторів, коли за рахунок зв'язку (за певного його рівня) це співвідношення стає близьким до раціонального.*

*Робота також може мати актуальність як науково-методична, оскільки демонструє різноманітні режими роботи простих автоколивних систем на прикладі простої комп'ютерної моделі їхньої взаємодії.*

*Ключові слова: хаотична динаміка, релаксаційний генератор, генератор шуму, зв'язані генератори, випадкова широтно-імпульсна модуляція.*

**Вступ.** Генератори шуму мають широке коло застосувань у багатьох галузях техніки. До найбільш поширених типів генераторів шуму належать системи, що використовують для отримання непередбачуваності певний природний випадковий процес, цифрові системи з мікроконтролерами чи сигнальними процесорами, які виконують програмний код генерації псевдовипадкових чисел, а також системи, що використовують явище динамічного хаосу, тобто непередбачуваної поведінки простих динамічних систем за виконання певних умов. Серед застосувань випадкових сигналів слід особливо відзначити їхнє використання у різноманітних системах інформаційної безпеки, зокрема, високонадійних криптографічних системах [1]. У наш час практично усі подібні системи є цифровими, тобто для них було б найбільш зручно отримувати випадкову послідовність у вигляді коду, або ж певного сигналу з імпульсною модуляцією.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Хаотична динаміка порівняно простих динамічних систем була вперше виявлена в другій половині ХХ сторіччя (докладніше див [2,3]). Було з'ясовано, що динамічна система, яка є нелінійною, нерівноважною та має хоча б півтора ступеня вільності (описується системою диференціальних рівнянь третього й вище порядку), може для певних значень параметрів демонструвати непередбачувану поведінку. Зокрема, такою системою може бути автогенератор з дещо ускладненою схемою. Прикладом таких систем служить генератор шуму Кияшка-Піковського-Рабіновича [2,3], що фактично являє собою генератор Ван-дер-Поля з додатковою немонотонною нелінійністю в коливному контурі, такою як тунельний діод. Наявність ємності такого діода додає системі додаткову половину ступеня вільності, й вона демонструє ряд хаотичних режимів коливань. Також слід відзначити схему Чуа [4], яка також являє собою LC-автогенератор з додатковою нелінійністю й при цьому демонструє непередбачувану поведінку, досить подібну до аналогічних явищ в

атмосфері. Подальший розвиток цього напрямку вже у недавні часи проводився у напрямку пошуку напівпровідникових структур, які можуть демонструвати хаотичну динаміку, і при цьому можуть бути включені у склад деякої інтегральної мікросхеми або ж бути використаними для генерації шуму в оптичному діапазоні [5]. Зазначимо, що у абсолютній більшості випадків досліджувалася хаотична динаміка у автогенераторах квазігармонічних коливань, таких як LC-генератор, в той час як для імпульсних та цифрових систем було б цікаво розглянути подібну поведінку для релаксаційних генераторів. Принципова можливість появи непередбачуваної поведінки існує для систем із декількох зв'язаних релаксаційних автогенераторів (двох та більше), які є нелінійними, нерівноважними і мають 2 та більше ступеня вільності. У даній роботі проводиться комп'ютерне моделювання для такої системи у випадку двох RC-генераторів.

**Побудова моделі.** На сьогодні існує дуже велика кількість різних схемотехнічних рішень для побудови релаксаційних генераторів. Втім, практично усі вони мають у своєму складі RC/RL кола, або ж подібні за принципом дії системи. Сталі часу цих кіл визначають період та тривалість генерованого імпульсу, причому перемикання здійснюються у моменти, коли перехідний процес у цих колах досягає певних порогових значень напруги. Зокрема, можна розглянути стандартну схему імпульсного генератора (автоколивного мультівібратора) на основі ІМС NE555 [9], зображену на рис. 1. Відомо, що тривалість імпульсу тут визначається сталою часу  $(R_A + R_B) \cdot C$ , тривалість паузи – сталою часу  $R_B \cdot C$ . Перемикання здійснюються, коли напруга на конденсаторі C досягає верхнього чи нижнього порогових значень.

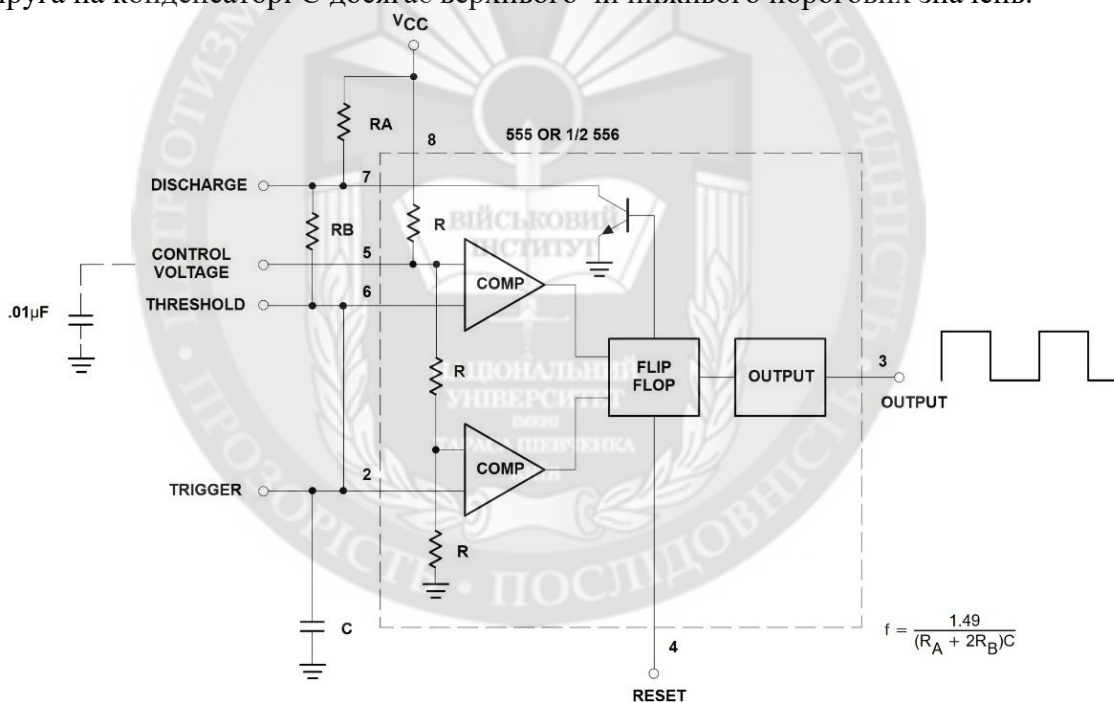


Рисунок 1 – Стандартна схема релаксаційного генератора на основі ІМС таймера NE555

Розглянемо тепер два генератори на зразок зображеного на рисунку 1, в яких параметри RC кіл дещо відрізняються одні від одних. Також будемо вважати, що перемикання у кожному генераторі здійснюються при досягненні відповідних порогових значень напруги на конденсаторах, але при цьому для кожного з конденсаторів існує вплив вихідної напруги іншого генератора. За таких умов перемикання одного з генераторів може привести як до автоматичного перемикання іншого генератора, так і до затримки його перемикання, в залежності від того, як здійснюється вплив. Схемотехнічно такий вплив можна, наприклад, створити застосувавши аналоговий суматор на базі операційного підсилювача [8].

Отже, напруга на конденсаторах у кожному з двох релаксаційних генераторів буде визначатися таким чином:

$$U_{C1,2} = \begin{cases} U_{ПН1,2} + \alpha_{1,2}t + \gamma_{12}U_{вих2,1} : U_{C1,2} < U_{ПВ1,2}; \\ U_{ПВ1,2} - \beta_{1,2}t + \delta_{12}U_{вих2,1} : U_{C1,2} > U_{ПН1,2}. \end{cases}$$

Тут  $U_{C1,2}$  - поточні значення напруги на конденсаторах першого та другого генераторів,  $\alpha_{1,2}$  - швидкості зростання напруги за рахунок перезарядження відповідних конденсаторів,  $\beta_{1,2}$  - відповідні швидкості спаду напруг,  $\gamma_{12}$  та  $\delta_{12}$  - коефіцієнти, що визначають вплив вихідної напруги іншого генератора на  $U_{C1,2}$  (ці коефіцієнти, взагалі кажучи, можуть бути як додатними, так і від'ємними),  $U_{ПН1,2}$  та  $U_{ПВ1,2}$  - верхня та нижня порогові напруги, за яких відбувається перемикання першого та другого генераторів,  $U_{вих2,1}$  - власне, вихідні напруги другого та першого генераторів.

Дана модель є досить загальною і, оскільки робота інших різновидів релаксаційних генераторів також здебільшого здійснюється подібним чином, може бути застосованою для досить широкого кола схем автогенераторів.

**Випадкова імпульсна послідовність.** Для розробленої моделі було проведено комп'ютерне моделювання. У випадку раціонального співвідношення між сталими часу RC кіл для першого та другого генераторів обидва генератори демонстрували квазіперіодичну поведінку для довільного коефіцієнту взаємного впливу між ними. Тому було розглянуто можливість ірраціонального співвідношення між цими сталими часу, зокрема, вважалося, що сталі часу RC кіл для першого та другого генераторів відрізняються у  $\sqrt{2} \approx 1.41$  разів (усі подальші результати наведені для цього співвідношення). Виявилось, що в такому випадку осцилограма коливань (рис. 2) подібна до випадкової імпульсної послідовності, а саме до коливань з випадковою широтно-імпульсною модуляцією (ВШІМ). Слід відзначити, що ВШІМ – коливання наразі викликають зацікавленість з точки зору ряду практичних застосувань, таких як побудова нових типів імпульсних вторинних джерел живлення [6], та схем керування електродвигунами [7].

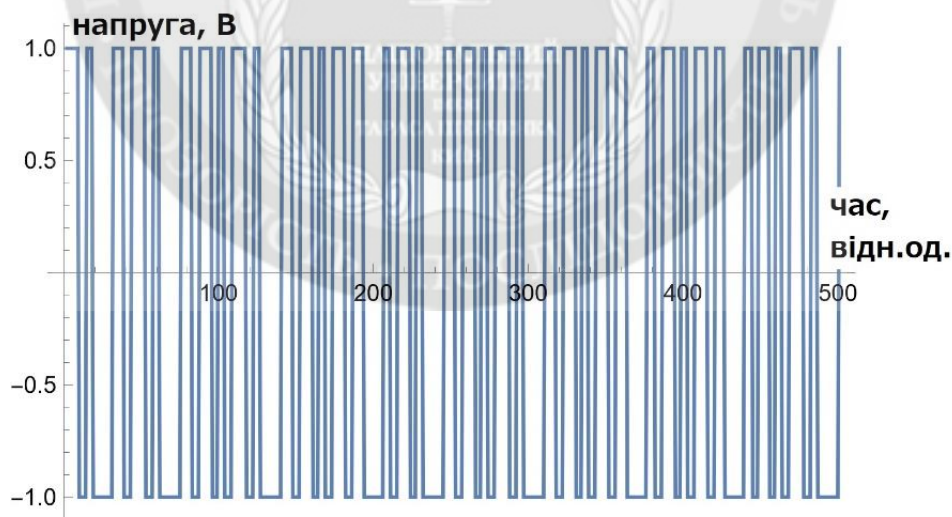


Рисунок 2 – Осцилограма коливань на виході першого генератора

Осцилограма коливань на конденсаторі першого релаксаційного генератора (рис. 3) дає змогу впевнитися, що взаємний вплив між генераторами дійсно є істотним:

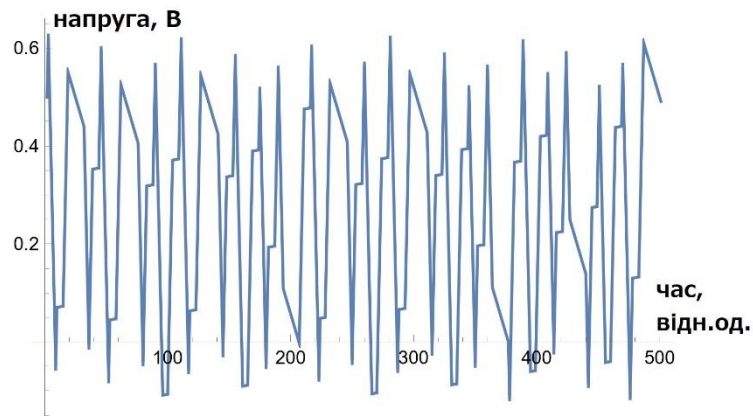


Рисунок 3 – Осцилограма коливань на конденсаторі першого генератора

Взаємний вплив виражається у досить частій зміні характеру перехідного процесу у RC колі кожного генератора, коли відбувається примусове перемикання одного з них за рахунок іншого.

Слід відзначити, що вигляд осцилограми коливань ще не дає впевненості у тому, що спостерігається генерація ВШІМ – коливань. Тому проаналізуємо їхній спектр потужності для різних рівнів взаємного впливу між генераторами. Навіть для невеликого коефіцієнту взаємного впливу (рис. 4) спостерігається розмиття спектру з утворенням значної суцільної складової. Це свідчить про те, що коливання дійсно можуть мати випадковий характер, а не є просто квазіперіодичними з накладанням двох основних частот, між якими існує ірраціональне співвідношення.



Рисунок 4 – Спектр коливань першого генератора для невеликого коефіцієнту впливу другого

Даний спектр є подібним до отриманого в роботі [10], спеціально присвяченій ВШІМ – коливанням. Цікавим також є питання, як залежатиме спектр коливань від рівня взаємного впливу між генераторами. На рис. 5 показаний тривимірний графік для спектру коливань першого генератора при різних коефіцієнтах впливу на нього з боку другого.

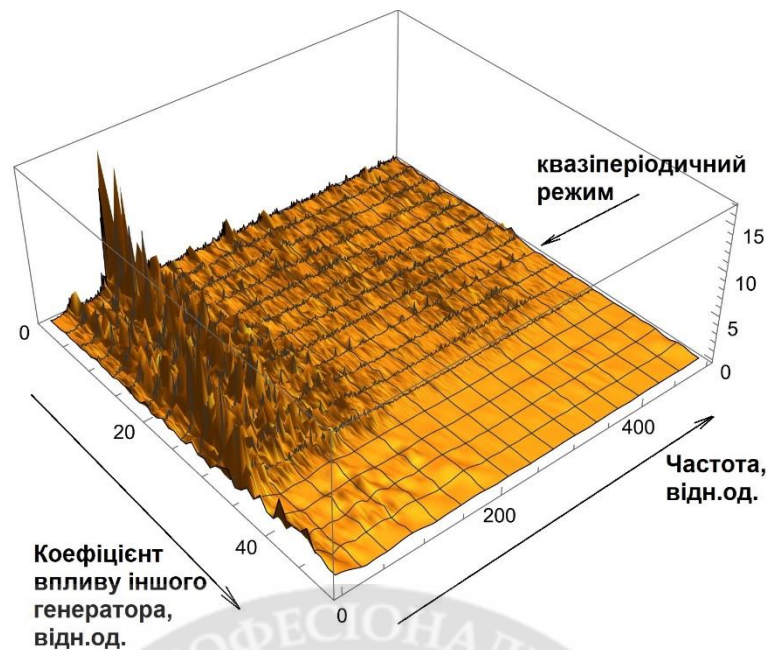


Рисунок 5 – Спектр коливань першого генератора в залежності від впливу другого

Можна відзначити, що загалом збільшення взаємного впливу приводить до певного вирівнювання спектральної залежності, і за деяких досить великих значень цього коефіцієнту з спектру взагалі зникають різкі максимуми, що відповідали частоті коливань окремого генератора. Втім, за деяких цілком визначених рівнів впливу спектр стає типовим для періодичного сигналу (це відзначено на рис. 5). Очевидно, за таких рівнів впливу співвідношення між частотами коливань двох генераторів стає близьким до раціонального. Усі графіки наведені лише для першого осцилятора, оскільки залежності для другого осцилятора дуже подібні.

**Висновки.** Комп'ютерне моделювання для загальної моделі взаємодії двох імпульсних (релаксаційних) генераторів, коли кожен з них впливає на перехідний процес в іншому й може спричинити перемикання показує, що такі коливання можуть набувати характеру випадкової імпульсної послідовності, а саме ВШІМ – коливань у випадку ірраціонального співвідношення між частотами коливань окремих (незв'язаних) генераторів. Цей результат узгоджується з нашими попередніми роботами [11,12], де розглядалася аналогічна задача для окремих традиційних типів релаксаційних генераторів, зокрема генераторів Пірсона-Ансона та мультівібраторів на основі біполярних транзисторів. Також з'ясовано, що збільшення рівня взаємного впливу між генераторами приводить до зменшення рівня окремих гармонік, які відповідають частотам періодичних коливань окремих автогенераторів при зростанні рівня суцільної складової спектру, характерної для хаотичних коливань. В той же час для певних виділених рівнів взаємного впливу коливання можуть стати майже періодичними, що відповідає встановленню раціонального співвідношення між частотами коливань за рахунок зв'язку. Подібні результати були вже давно отримані для автогенераторів квазігармонічних коливань, але для релаксаційних автогенераторів це питання ще потребує додаткових досліджень. Результат роботи також цікавий з точки зору методики викладання студентам курсів, пов'язаних з теорією коливань та автогенераторами, оскільки вельми проста модель, побудована на основі стандартної схеми імпульсного генератора дає змогу проілюструвати студентам різні режими роботи автоколивних систем, включно з режимами хаотичної динаміки.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Introduction to modern cryptography: principles and protocols / J.Katz, Y.Lindell. Boca Raton: CRC PRESS, 2007, 553 p.

2. Введение в теорию колебаний и волн / М.И.Рабинович, Д.И.Трубецков. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000, 560с.
3. Коливання та хвилі / І.О.Анісімов. К. : ВПЦ «Київський університет», 2009, 399 с.
4. Chua L. O., Komuro M., Matsumoto T. The Double Scroll Family. *IEEE Transactions on Circuits & Systems*. 1986, Vol. CAS-33, No. 11, P. 1073–1118.
5. Nonlinear Spatio-Temporal Dynamics and Chaos in Semiconductors / E.Schöll. Cambridge University Press, 2001, 241 p.
6. Kiran, T.S., Bisharathubeevi, A., Pavithran, K.N., A Comparative Exploration on Random PWM schemes to Spread Harmonics for Multilevel Power Converters using Cascaded H-bridge Configuration. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018, Vol. 13, No. 22, P. 15696-15700.
7. Sadhu, N.L., Teegala, B.R., Marapu, V.K. Constant and variable switching frequency random PWM strategies for open-end winding induction motor drive. *Journal of Power Electronics*. 2020, Vol. 20, P. 1488–1495.
8. The Art of Electronics / P.Horowitz, W.Hill. Cambridge University Press, 2015, 1192 p.
9. NE/SA/SE555/SE555C Timer IC product specification / Philips Semiconductors. 1994, 7 p.
- 10.Kowalik, S. Random pulse width modulation. L. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Ostrava. 2016. [https://www.researchgate.net/publication/305083096\\_Random\\_pulse\\_width\\_modulation](https://www.researchgate.net/publication/305083096_Random_pulse_width_modulation)
- 11.Denys A.A., Kelnyk O.I., Scorohod M.K. Computer simulation for two parametrically coupled Pearson-Anson relaxation oscillators. XII International Young Scientists Conference on Applied Physics. Proceedings. 2012, P.238-239.
- 12.Gorovenko M.V., Kelnyk O.I., Nikirin A.V., Nikitchyn O.M., Shavrin A.S. Computer simulation for two parametrically coupled Pearson-Anson relaxation oscillators. XII International Young Scientists Conference on Applied Physics. Proceedings. 2012, P.240-242.

#### REFERENCES:

1. Katz J., Lindell Y. (2007) “Introduction to modern cryptography: principles and protocols”, Boca Raton: CRC PRESS, 553 p.
2. Rabinovich, M.I., Trubetskov D.I. (2000) “Vvedenie v teoriyu kolebaniy i voln” [Introduction to the theory of oscillations and waves], NIC “Regulyarnaya I haoticheskaya dinamika”, 560 p.
3. Anisimov, I.O. (2009) “Kolywannya ta Hvyli” [Oscillations and waves], Kyiv University, 399 p.
4. Chua, L. O., Komuro, M., Matsumoto, T. “The Double Scroll Family”, *IEEE Transactions on Circuits & Systems*, 1986, vol. CAS-33, no. 11, pp. 1073–1118.
5. E. Schöll. (2001) “Nonlinear Spatio-Temporal Dynamics and Chaos in Semiconductors”, Cambridge University Press, 241 p.
6. Kiran, T.S., Bisharathubeevi, A., Pavithran, K.N., A Comparative Exploration on Random PWM schemes to Spread Harmonics for Multilevel Power Converters using Cascaded H-bridge Configuration, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, vol. 13, no. 22, pp. 15696-15700.
7. Sadhu, N.L., Teegala, B.R., Marapu, V.K. Constant and variable switching frequency random PWM strategies for open-end winding induction motor drive, *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1488–1495.
8. Horowitz P., Hill W. (2015) “The Art of Electronics”, Cambridge University Press, 1192 p.
9. “NE/SA/SE555/SE555C Timer IC product specification” (1994), Philips Semiconductors., 7 p.
- 10.Kowalik, S. “Random pulse width modulation”, L. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Ostrava. 2016. [https://www.researchgate.net/publication/305083096\\_Random\\_pulse\\_width\\_modulation](https://www.researchgate.net/publication/305083096_Random_pulse_width_modulation)
- 11.Denys, A.A., Kelnyk, O.I., Scorohod, M.K. “Computer simulation for two parametrically coupled Pearson-Anson relaxation oscillators”, XII International Young Scientists Conference on Applied Physics. Proceedings. 2012, pp.238-239.
- 12.Gorovenko, M.V., Kelnyk, O.I., Nikirin, A.V., Nikitchyn, O.M., Shavrin, A.S. “Computer simulation for two parametrically coupled Pearson-Anson relaxation oscillators”, XII International Young Scientists Conference on Applied Physics. Proceedings. 2012, pp.240-242.

**FEATURES OF RANDOM PULSE SEQUENCE  
ON THE OUTPUT OF COUPLED RELAXATION OSCILLATORS' SYSTEM**

*Computer simulation of the system with two coupled relaxation oscillators is presented. Oscillators are connected in the way that each of them has influence upon the pulses' period and length for another. Under those conditions, one has a nonlinear non-equilibrium system with two degrees of freedom. According to general concepts, chaotic dynamics (unpredictable behavior of the relatively simple dynamic system) is possible in this system. As a result, oscillations' spectrum has significant continuous part if ratio between frequencies of both particular non-coupled oscillators is an irrational number. That can be associated with possibility of the noise in this system. If mutual influence between oscillators becomes stronger, continuous part of spectrum grows. Meanwhile, influence of particular harmonics that corresponding to non-coupled oscillators, decreases. Comparison with the results of another researchers shows that such spectrum can be associated with random pulse width modulation, and such a modulation is being actively researched now in order to create new types of power supply systems and control devices for electromechanical units such as electric motors.*

*Among the other results of paper, rational number as a ratio between frequencies of both particular non-coupled oscillators tends to quasi-periodical oscillations to be observed for, practically, any level of coupling between oscillators. Those quasi-periodical oscillations are also observed with irrational number as that ratio, but only for definite coupling level when this ratio shifts to be close to rational.*

*This paper also has some value as methodical because it shows various modes of simple non-equilibrium systems with simple computational model for their interaction.*

*Key words: Chaotic Dynamics, Relaxation Oscillator, Noise Generator, Coupled Generators, Random Pulse Width Modulation.*

