

## **ХАОС В ФАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ ОСЦИЛЛЯТОРА ВАН ДЕР ПОЛЯ С МОДУЛИРОВАННОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

*С.В. Баранов, С.П. Кузнецов, В.И. Пономаренко*

Предложен генератор хаоса на основе осциллятора ван дер Поля с двумя дополнительными цепями запаздывающей обратной связи. Осциллятор пребывает поочередно в режиме возбуждения и затухания в силу периодического изменения параметра, ответственного за бифуркацию рождения предельного цикла. Возбуждение колебаний на каждой новой стадии активности стимулируется сигналом, который возникает в результате смешения на квадратичном нелинейном элементе первой и второй гармоник сигналов, поступивших по цепям обратной связи и порожденных на двух предыдущих стадиях активности. Для разности фаз на последовательных стадиях возбуждения реализуется растягивающее отображение окружности (отображение Бернулли) с хаотической динамикой. Предпринято численное исследование динамики системы; представлены реализации, портреты аттрактора, результаты расчета показателей Ляпунова, оценка размерности, а также спектр генерируемого сигнала. Предложенная система реализована в виде радиотехнического устройства. Представлены экспериментальные данные, находящиеся в качественном соответствии с результатами численных расчетов.

*Ключевые слова:* Осциллятор ван дер Поля, отображение Бернулли, аттрактор Смейла–Вильямса, гиперболический хаос.

## **CHAOS IN THE PHASE DYNAMICS OF Q-SWITCHED VAN DER POL OSCILLATOR WITH ADDITIONAL DELAYED FEEDBACK LOOP**

*S.V. Baranov, S.P. Kuznetsov, V.I. Ponomarenko*

We present chaos generator based on a van der Pol oscillator with two additional delayed feedback loops. Oscillator alternately enters active and silence stages due to periodic variation of the parameter responsible for the Andronov–Hopf bifurcation. Excitation of the oscillations on each new activity stage is forced by signal resulting from mixing of the first and the second harmonics of signals from previous activity stages, transported through the feedback loops. The phase difference between each two neighboring successive activity stages evolves in accordance to the Bernoulli doubling map, with chaotic dynamics. We discuss results of numerical studies:

time dependences of variables, attractor portraits, Lyapunov exponents, and power spectrum. The proposed system is implemented as an electronic device, and experimental data are found to be in good correspondence with the computations.

*Keywords:* van der Pol oscillator; Bernoulli doubling map; Smale–Williams solenoid; hyperbolic chaos.