

DESAIN DAN SIMULASI NUMERIK SINKRONISASI *UNIDIRECTIONAL* SIRKUIT JERK SERTA APLIKASINYA PADA SISTEM KEAMANAN KOMUNIKASI

Aceng Sambas^{1,3}, Mada Sanjaya W.S.^{1,2}, Mustafa Mamat³

¹Bolabot Techno Robotic Institute,
CV. Sanjaya Star Group, Bandung, INDONESIA

²Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung, INDONESIA

³Faculty of Informatic and Computing, Universiti Zaenal Abidin, Kuala Terengganu, MALAYSIA

E-mail: acenx.bts@gmail.com

Halaman 19-31

Diterima: 6 Oktober 2014, Direview: 15 November 2014, Dipublikasi: 17 Desember 2014

ABSTRAK

Sistem chaos mempunyai karakteristik unik yang nilainya sangat sensitif terhadap perubahan parameter dan kondisi awal, mirip dengan perilaku acak namun tetap deterministik. Chaos mempunyai potensi yang baik untuk dijadikan sistem keamanan komunikasi. Dalam makalah ini, kami menunjukkan fenomena chaos dari sirkuit Jerk dengan *modulus* non-linier. Perilaku chaos ini berfungsi sebagai variabel parameter kontrol. Penelitian awal dalam makalah ini adalah menganalisis diagram fase, diagram bifurkasi dan peta Poincare dari sirkuit Jerk. Analisis sinkronisasi *unidirectional* antara dua sistem chaos yang identik juga telah disajikan dalam makalah ini. Berdasarkan hasil sinkronisasi chaos tersebut, akhirnya efektivitas sinkronisasi *unidirectional* antara dua sistem Jerk yang identik dalam sistem keamanan komunikasi menunjukkan potensi untuk dijadikan sebagai *masking* pengiriman data. Integrasi fisika teoritis, simulasi numerik menggunakan MATLAB serta implementasi simulasi sirkuit menggunakan MultiSIM telah dilakukan dalam makalah ini.

Kata Kunci : Sirkuit Jerk, chaos, Sinkronisasi Unidirectional, Keamanan Komunikasi

PENDAHULUAN

Chaos digunakan untuk menggambarkan perilaku sistem dinamika non linier tertentu, yaitu, sistem variabel keadaan yang kontinu terhadap waktu yang menunjukkan dinamika yang kompleks serta sangat sensitif pada perubahan parameter dan kondisi awal. Hasil dari sensitivitas ini, memanifestasikan pertumbuhan gangguan eksponensial pada kondisi awal dan perilaku chaos yang terlihat acak [1]. Perilaku chaos telah ditemukan dalam berbagai bidang seperti fisika [2], kimia [3], biologi [4], robot [5], bit generator [6], psikologi [7], ekologi [8-9] dan ekonomi [10].

Selama dekade terakhir, sinkronisasi sistem chaos telah dieksplorasi sangat intensif oleh banyak peneliti dengan menggunakan sirkuit elektronik, seperti sirkuit Rössler [11], sirkuit Duffing [12], sirkuit Chua [13], sirkuit Double Bell [14], sistem jaringan saraf FitzHugh-Nagumo [15] dan model jaringan saraf Hindmarsh-Rose [16]. Untuk selanjutnya, motivasi utama potensi aplikasi praktis dalam sistem keamanan komunikasi [17-22]. Pecora dan Carroll menunjukkan bagaimana sistem chaos dalam sirkuit elektronika dapat disinkronkan [18].

Inovasi ini memberikan perspektif baru dalam dinamika chaos dan terinspirasi dari banyak studi tentang sinkronisasi pada sistem chaos. Cuomo dan Oppenheim mengeksplorasi hasil penelitiannya

dengan menunjukkan bagaimana sistem chaos disinkronkan dan digunakan dalam skema untuk sistem keamanan komunikasi [19].

Sinkronisasi antara sinyal chaos telah menerima banyak perhatian dan menyebabkan berbagai aplikasi komunikasi. Banyak peneliti menunjukkan, chaos dapat disinkronkan dan diterapkan untuk sistem keamanan komunikasi. Seperti skema komunikasi serat optik menggunakan chaos [20], komunikasi yang aman menggunakan *cipher* chaos [21] dan komunikasi dengan chaos laser [22].

Dalam makalah ini terdiri dari beberapa pembahasan. Pada bagian 2, dilakukan simulasi numerik dan simulasi sirkuit Jerk menggunakan MATLAB 2010 dan MultiSIM 10. Dalam Bagian 3, dilakukan pengujian metode sinkronisasi *unidirectional* untuk sinkronisasi dua sistem sirkuit Jerk *autonomous* yang identik. Skema sistem keamanan komunikasi dengan menggunakan teknik sinkronisasi dengan memanfaatkan sinyal chaos disajikan dalam bagian 4. Terakhir, bagian 5 berisi kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian.

MODEL MATEMATIKA SIRKUIT JERK

Sprott menemukan bentuk fungsional dari sistem dinamik tiga dimensi yang dapat menghasilkan fenomena chaos. Persamaan Jerk memiliki fungsi non linier sederhana yang dapat diimplementasikan dalam bentuk sirkuit elektronik *autonomous*. Sirkuit Jerk pertama kali disajikan oleh Sprott pada tahun 2000 [23]. Sistem sirkuit Jerk merupakan sistem non linier *autonomous* tiga-dimensi yang dapat digambarkan oleh sistem persamaan diferensial biasa berikut:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -az - by + |x| - 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Persamaan ini hanya memiliki satu bagian non linier dalam bentuk nilai mutlak dari variabel x . Jika diberikan parameter dan kondisi awal dari sistem Jerk (1) sebagai berikut: $a = 0.6$ dan $b = 1$ dan $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$. Sistem Jerk memiliki dua titik ekuilibrium $(1, 0, 0)$ dan $(-1, 0, 0)$.

Untuk titik ekuilibrium $(1, 0, 0)$, matriks Jacobi menjadi:

$$J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -0.9 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Nilai-nilai eigen diperoleh dengan memecahkan persamaan karakteristik, $\det [J_1 - \lambda] = 0$ yaitu:

$$\lambda^3 + 0.9\lambda^2 + \lambda + 1 = 0 \quad (3)$$

Maka diperoleh nilai eigen sebagai berikut: $\lambda_1 = -0.835551$, $\lambda_2 = 0.117776 - 1.08763 i$, $\lambda_3 = 0.117776 + 1.08763 i$ untuk $a = 0.6$, $b = 1$. Untuk titik ekuilibrium $(-1, 0, 0)$, matriks Jacobi menjadi:

$$J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -0.9 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Nilai-nilai eigen diperoleh dengan memecahkan persamaan karakteristik, $\det [J_2 - \lambda] = 0$ yaitu:

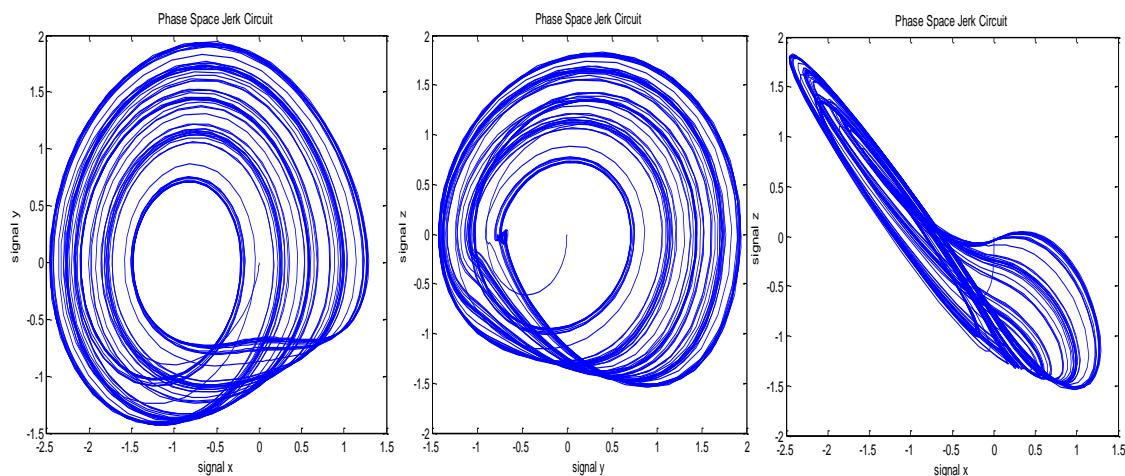
$$\lambda^3 + 0.9\lambda^2 + \lambda - 1 = 0 \quad (5)$$

maka diperoleh nilai eigen sebagai berikut: $\lambda_1 = 0.588458$, $\lambda_2 = -0.594229 - 1.16028 i$, $\lambda_3 = -0.594229 + 1.16028 i$ untuk $a = 0.6$, $b = 1$. Nilai eigen diatas menunjukkan bahwa sistem ini memiliki

perilaku spiral tidak stabil. Dalam kasus ini, salah satu syarat terjadinya fenomena chaos telah terpenuhi.

SIMULASI NUMERIK MENGGUNAKAN MATLAB 2010

Pada bagian ini, simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan MATLAB 2010. Metode Runge-Kutta digunakan untuk memecahkan sistem persamaan diferensial (1). Gambar 1 (a)-(c) menunjukkan proyeksi orbit ruang fase pada masing-masing bidang xy , bidang $y-z$ dan bidang $x-z$. Seperti yang ditunjukkan, untuk set parameter dan kondisi awal yang dipilih, sistem Jerk menyajikan *attractor* chaos jenis Rössler. Terdapat tiga metode untuk menguji terjadinya kondisi chaos, yaitu spektrum Lyapunov eksponen, diagram Bifurkasi, serta peta Poincare.

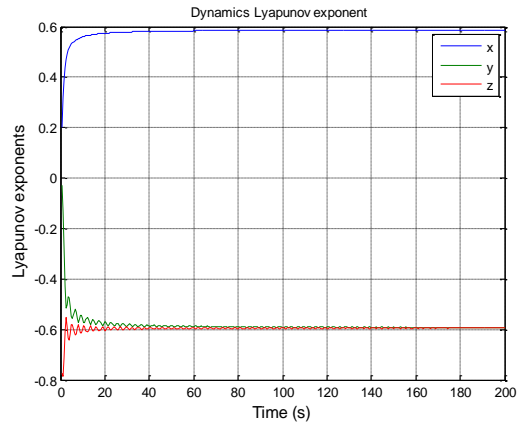


Gambar 1. Hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB 2010, dengan $a = 0,6$ dan $b = 1$: (a) bidang xy , (b) bidang yz , (c) bidang xz .

Terlihat bahwa sistem (1) merupakan sistem tiga dimensi sehingga terdapat tiga nilai Lyapunov eksponen ($LE1$, $LE2$, $LE3$). Secara lebih rinci untuk sistem disipatif kontinu 3D nilai-nilai Lyapunov eksponen berguna untuk membedakan antara berbagai jenis orbit. Jadi, kemungkinan spektrum *attractor*, dapat diklasifikasikan dalam empat kelompok, berdasarkan Lyapunov eksponen [24 -27] sebagai berikut:

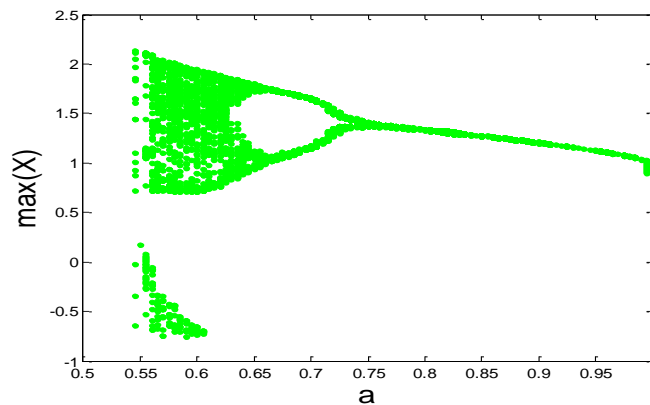
- ($LE1$, $LE2$, $LE3$) \rightarrow ($-$, $-$, $-$): *fixed point*
- ($LE1$, $LE2$, $LE3$) \rightarrow (0 , $-$, $-$): *limit point*
- ($LE1$, $LE2$, $LE3$) \rightarrow (0 , 0 , $-$): *two-torus*
- ($LE1$, $LE2$, $LE3$) \rightarrow ($+$, 0 , $-$): *strange attractor* .

Jadi, sesuai dengan aturan diatas, Gambar 2 memperlihatkan bahwa sistem Jerk dengan parameter $a = 0.6$ dan $b=1$ dan kondisi awal $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ memenuhi kriteria fenomena chaos.

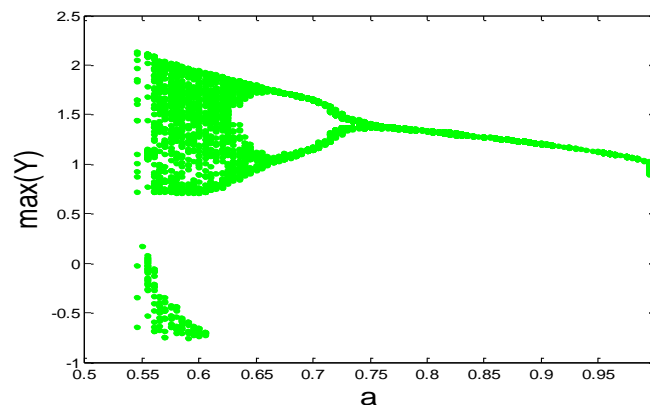


Gambar 2. Dinamika Lyapunov eksponen dari sistem Jerk, pada saat $a = 0.6$ dan $b=1$.

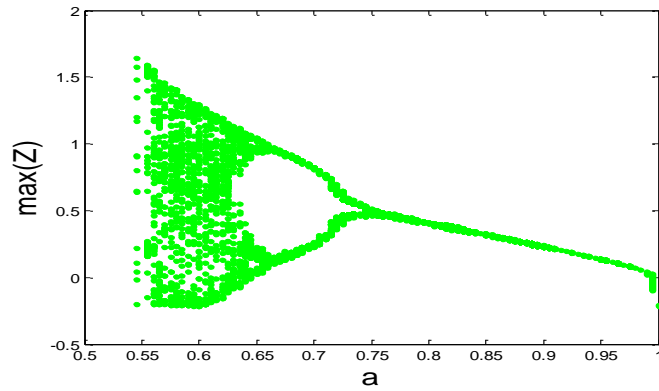
Metode lain untuk menganalisis perilaku chaos adalah dengan menggunakan diagram bifurkasi yang pertama kali dikembangkan oleh Poincaré. Diagram bifurkasi digunakan untuk menunjukkan perubahan kualitatif dalam perilaku sistem, dalam hal jumlah dan jenis solusi, di bawah variasi satu atau lebih parameter pada sistem terkopel [28-29]. Untuk mengamati dinamika sistem dalam semua kemungkinan, diagram bifurkasi dapat dibangun untuk menunjukkan variasi salah satu keadaan variabel terhadap salah satu parameter kontrol. Sebuah diagram bifurkasi untuk sirkuit Jerk terlihat pada Gambar 3(a)-(c) pada interval $0,55 \leq a \leq 1$. Untuk range nilai $0,55 \leq a \leq 0,6$ sistem menampilkan perilaku chaos. Untuk $0,6 < a \leq 0,76$, terlihat perilaku dinamik dengan 2 osilasi periodik, dan untuk $a > 0.76$ sistem berosilasi secara periodik tunggal.



(a)



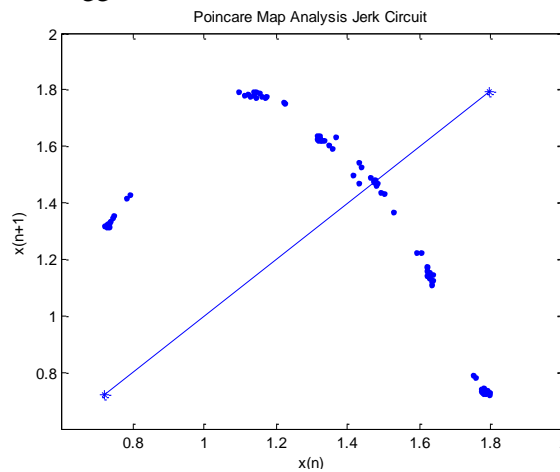
(b)



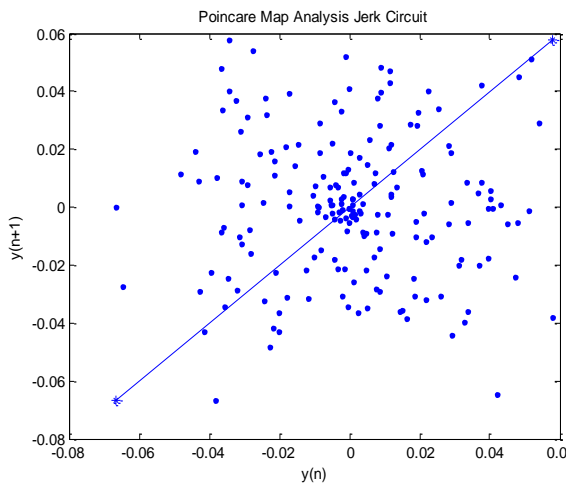
(c)

Gambar 3. (a) Diagram bifurkasi x vs parameter kontrol, (b) Diagram bifurkasi y vs parameter kontrol dan (c) Diagram bifurkasi dari z vs parameter kontrol

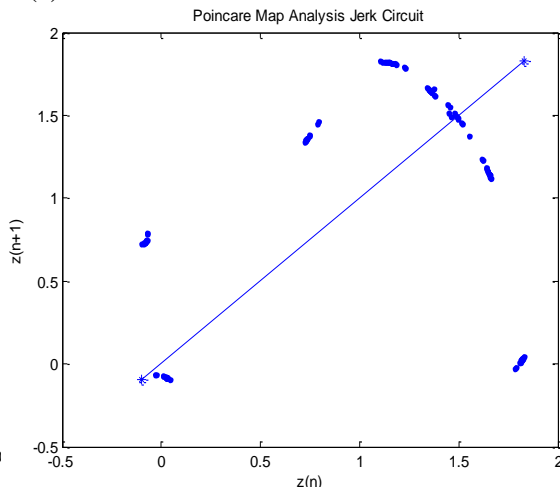
Metode lain yang berguna untuk menganalisis karakteristik dinamik dari sistem non linier adalah peta Poincaré. Dalam keadaan chaos, peta poincare terlihat padat dilintasi oleh attractor hal ini berarti saat keadaan chaos, attractor akan melalui lintasan secara berbeda dalam tiap periode. Hal ini dapat diindikasikan dari *minima* dan *maxima* gerak attractor. Jadi, salah satu cara untuk menangkap fitur kualitatif *strange attractor* adalah dengan menganalisis peta Poincaré [28,30]. Gambar 4 (a) - (c) menunjukkan bagian peta Poincaré dengan menggunakan MATLAB, untuk $a = 0,6$ dan $b = 1$.



(a)



(b)



(c)

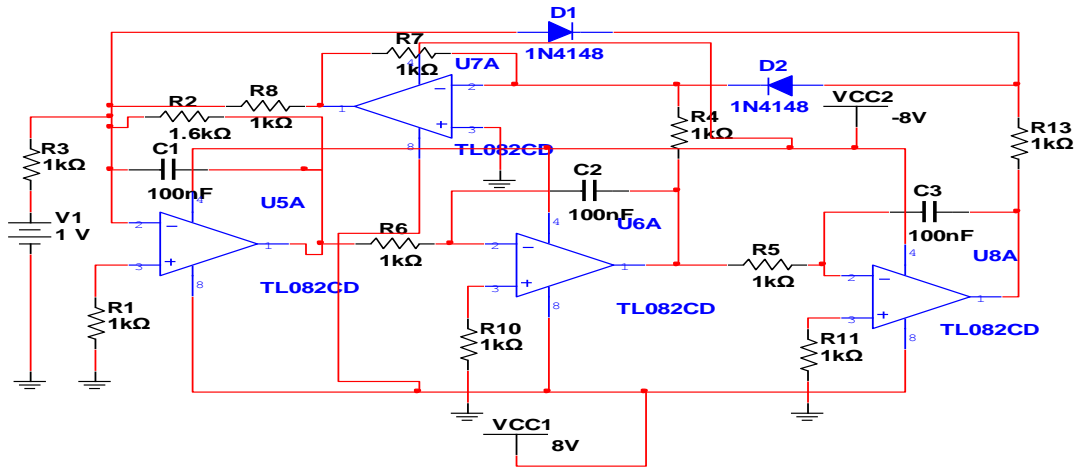
Gambar 4. Peta Poincare untuk sistem (1) ketika $a = 0.6$ dan $b = 1$: (a) Plot diberi maxima $x(n + 1)$ terhadap $x(n)$, (b) Plot maxima dari $y(n + 1)$ terhadap $y(n)$, (c) Plot maxima dari $z(n + 1)$ terhadap $z(n)$

SIMULASI SIRKUIT JERK MENGGUNAKAN MULTISIM

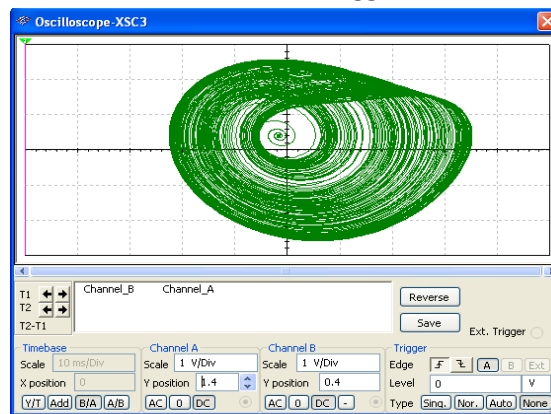
Desain sirkuit analog dari sistem chaos Jerk (1) ditunjukkan pada Gambar 5. Sirkuit Jerk ini juga memiliki *attractor* dinamika. Hubungan antara resistor R , R_A digunakan dalam rangkaian dan parameter 'a' yang disebutkan dalam sistem (1) diberikan di bawah ini. Berikut R dan R_A diukur dalam $K\Omega$.

$$R_A = \frac{R}{a} \tag{6}$$

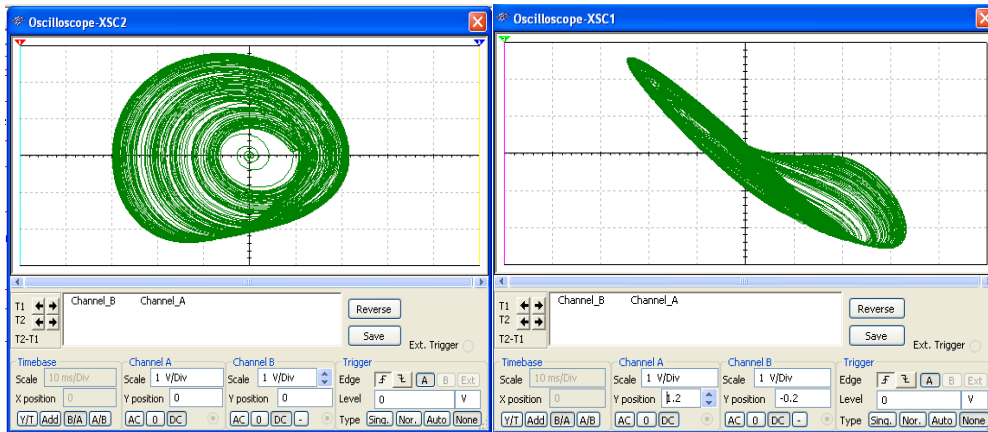
dimana $R_A = R_2 = 2 K\Omega$ dan $R = 1 K\Omega$. Terjadinya *attractor* chaos dapat dengan jelas dilihat pada Gambar 6 (a)-(c). Dengan membandingkan Gambar 1 (a)-(c) dengan Gambar 6 (a)-(c) perbandingan kualitas antara integrasi numerik (1) dengan menggunakan MATLAB 2010, dan simulasi rangkaian dengan menggunakan MultiSIM 10.0, dapat disimpulkan memiliki kemiripan karakteristik sinyal.



Gambar 5. Skema Sirkuit Jerk menggunakan MultiSIM 10.0



(a)



(b)

(c)

Gambar 6. Galeri proyeksi *attractor* chaos menggunakan MultiSIM 10.0, untuk $a = 0,6$ dan $b = 1$: (a) bidang xy (b) bidang yz (c) bidang xz .

SINKRONISASI UNIDIRECTIONAL SIRKUIT JERK

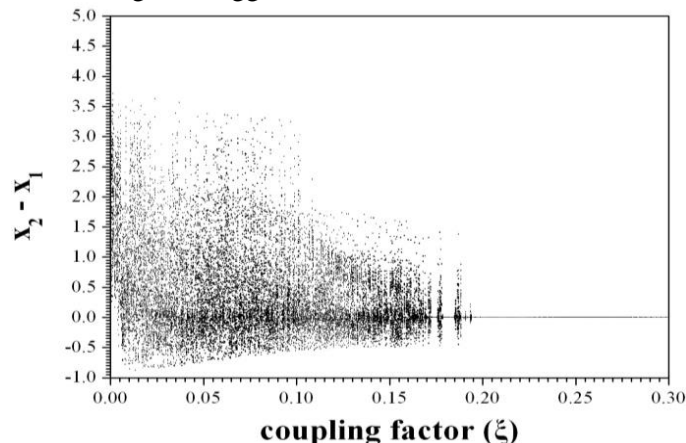
Skema umum untuk sinkronisasi di sini adalah untuk mengambil sistem *master*, membuat subsistem *drive* dan duplikat dari subsistem ini, disebut respon atau sistem *slave*, dengan sinyal dari sistem *drive*. Konfigurasi *master-slave* (*unidirectional*) dapat digambarkan oleh persamaan berikut:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Master} \\ & \dot{x}_1 = y_1 \\ & \dot{y}_1 = z_1 + \xi(y_2 - y_1) \\ & \dot{z}_1 = -az_1 - by_1 + |x_1| - 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

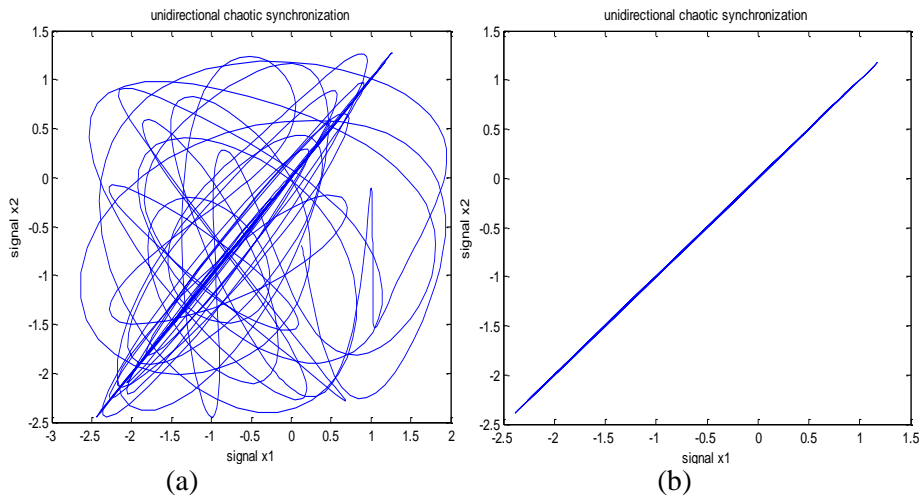
$$\left. \begin{aligned} & \text{Slave} \\ & \dot{x}_2 = y_2 \\ & \dot{y}_2 = z_2 \\ & \dot{z}_2 = -az_2 - by_2 + |x_2| - 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

dimana, ξ adalah faktor kopling. Simulasi numerik menggunakan Runge-Kutta digunakan untuk menggambarkan dinamika fenomena sistem sinkronisasi *unidirectional* sirkuit Jerk (7-8).

Pada Gambar 7 diagram bifurkasi $(x_2 - x_1)$ vs ξ ditampilkan. Dari diagram ini saat faktor kopling rendah ($0 < \xi \leq 0.194$) sinkronisasi tidak terjadi, sedangkan jika kopling faktor ($\xi > 0.194$) maka sinkronisasi akan terjadi. Gambar 8 (a) menunjukkan fenomena tidak sinkron pada saat parameter kopling $\xi = 0.184$, sementara pada Gambar 8 (b) menunjukkan fenomena sinkronisasi chaos ketika parameter kopling $\xi = 0.250$ dengan menggunakan MATLAB 2010.



Gambar 7. Diagram bifurkasi (x_2-x_1) vs ξ , dalam kasus kopling *unidirectional*.



Gambar 8. Simulasi fase potret x_2 vs x_1 , dalam kasus kopling *unidirectional*, untuk (a) $\xi = 0,184$ dan (b) $\xi = 0,25$, dengan MATLAB 2010.

APLIKASI SINYAL CHAOS PADA SISTEM KEAMANAN KOMUNIKASI

Untuk membuat sistem keamanan komunikasi, sinyal chaos dapat berfungsi sebagai masking data informasi. Untuk mempelajari efektivitas sinyal masking dalam sistem keamanan komunikasi. Pertama, kita mengatur sinyal informasi $m_s(t)$ dalam bentuk gelombang sinusoidal:

$$m_s(t) = A \sin(2\pi f)t \tag{9}$$

dimana A dan f adalah amplitudo dan frekuensi dari masing-masing sinyal gelombang sinusoidal.

Penjumlahan sinyal $m_s(t)$ dan sinyal chaos $m_{Jerk_circuit}(t)$, yang dihasilkan oleh sirkuit Jerk adalah enkripsi sinyal baru $m_{encryption}(t)$, yang diberikan oleh Persamaan. (10).

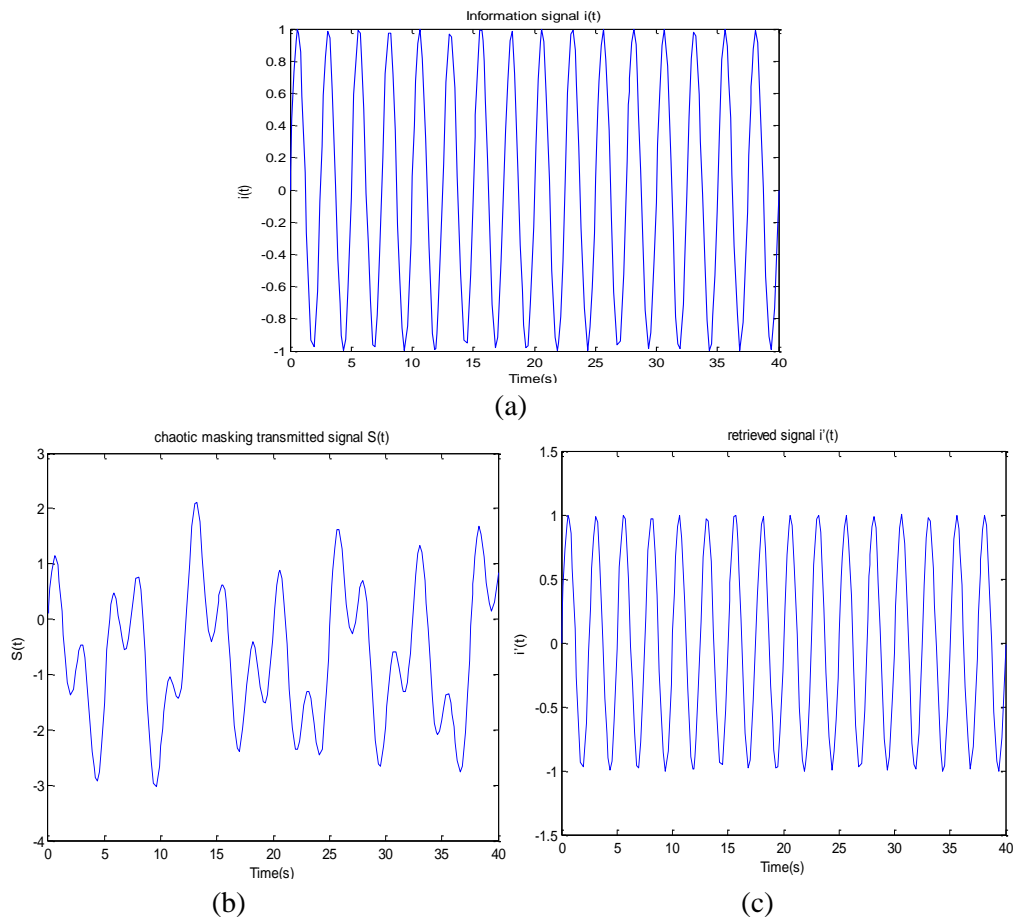
$$m_{encryption}(t) = m_s(t) + m_{Jerk_circuit}(t) \tag{10}$$

Sinyal $m_{Jerk_circuit}(t)$ adalah salah satu parameter dari persamaan (10). Setelah menyelesaikan proses enkripsi sinyal asli dapat dipulihkan dengan prosedur berikut.

$$m_{New_Signal}(t) = m_{encryption}(t) - m_{Jerk_circuit}(t) \tag{11}$$

Jadi, $m_{New_Signal}(t)$ adalah sinyal asli dan harus sama dengan $m_s(t)$. Karena sinyal input dapat dipulihkan kembali sebagai sinyal output, maka sinyal chaos berpotensi untuk dapat digunakan sebagai masking data informasi.

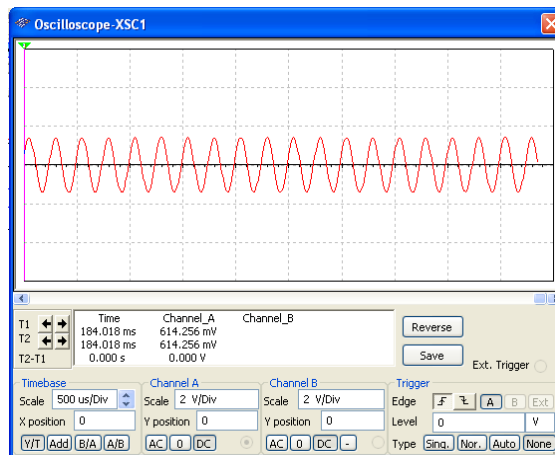
Gambar 9 (a)-(c) menunjukkan hasil simulasi numerik dengan MATLAB 2010 untuk skema masking komunikasi chaos, untuk $A = 1V$ dan $f = 4 KHz$. Nilai yang dipilih dari faktor kopling adalah $\xi = 0.250$ agar sistem berada dalam daerah sinkronisasi chaos.



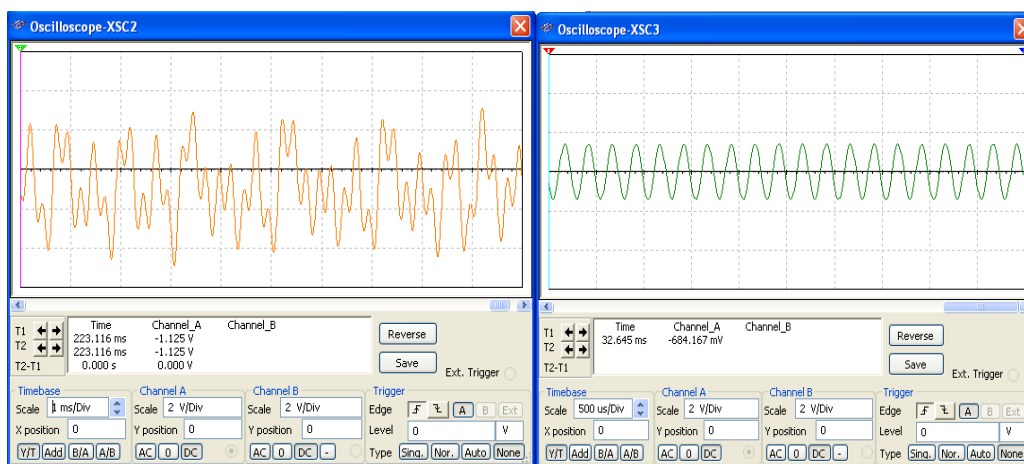
Gambar 9. Simulasi numerik sistem *masking* komunikasi, untuk $A = 1V$ dan $f = 4\text{ KHz}$: (a) Sinyal informasi, (b) sinyal chaos yang ditransmisikan, (c) Sinyal informasi baru.

Pada tahun 1990, Louis M. Pecora dan Thomas L. Carrol pertama kali menemukan fenomena sinkronisasi dua sistem chaos identik. Kita tahu bahwa kekacauan deterministik dapat menghasilkan perilaku dinamik chaos. Oleh karena itu, sinyal chaos sangat cocok untuk dijadikan sistem keamanan komunikasi. Pada tahun 1993, Cuomo dan Oppenheim menyajikan skema pertama dari perangkat komunikasi dua osilator Lorenz yang identik.

Prinsip sistem keamanan komunikasi adalah Informasi rahasia oleh sinyal chaos pada pemancar, dan kemudian dikirim ke penerima melalui saluran publik. Akhirnya sinyal terenkripsi oleh penerima. Dalam skema ini, masalah utama adalah bahwa dua generator chaos yang identik dalam *transmitter* dan *receiver* perlu disinkronkan agar sinyal data informasi dapat dipulihkan kembali. Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi untuk sistem sinyal *masking* komunikasi menggunakan MultiSIM 10.0.



(a)

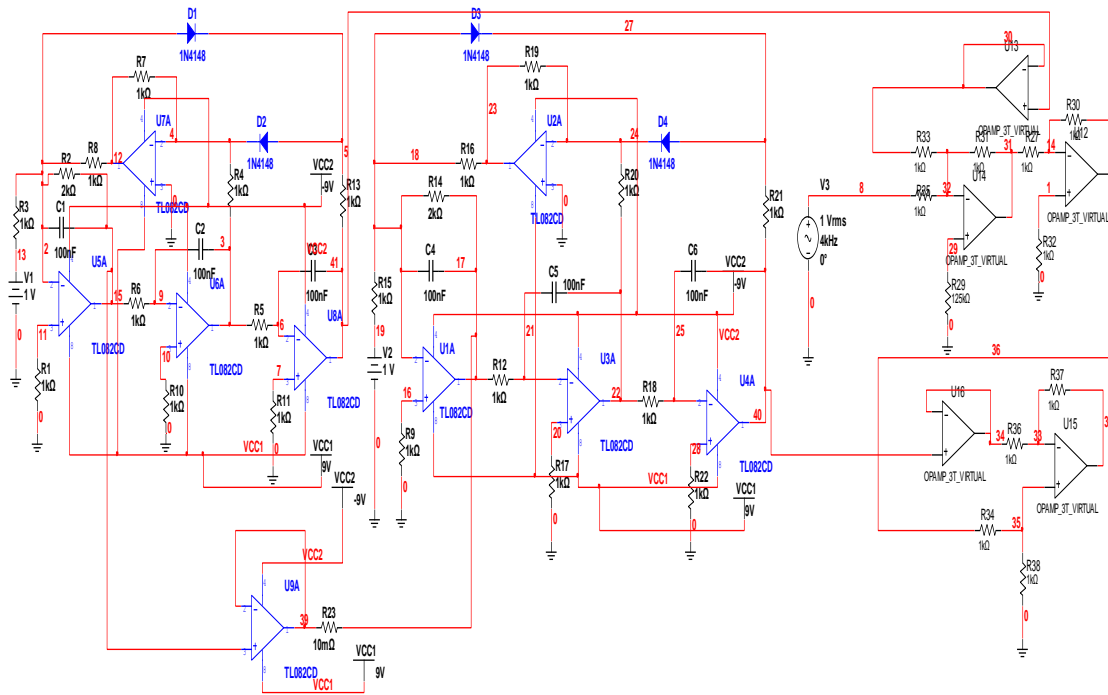


(b)

(c)

Gambar 10. Multisim 10,0 output dari sirkuit Jerk sistem masking komunikasi ketika amplitudo 1 V dan frekuensi 4 KHz (a) Sinyal informasi, (b) sinyal chaos yang ditransmisikan, (c) Sinyal informasi baru

Dalam skema *masking* sinyal informasi, pada bagian *transmitter* sinyal gelombang sinusoidal dengan amplitudo 1 V dan frekuensi 4 KHz pada Gambar 10(a) dimodulasikan dengan sinyal chaos dari sirkuit Jerk *master* yang sebelumnya telah sinkron dengan sirkuit Jerk *slave*. Sinyal yang dihasilkan adalah sinyal informasi yang telah *dimasking* oleh sinyal chaos seperti terlihat pada Gambar 10(b). Kemudian oleh *receiver*, sinyal informasi *termasking* tersebut kemudian dipisahkan kembali dari sinyal chaos sehingga output akhirnya adalah data informasi seperti pada Gambar 10(c). Gambar 11 menunjukkan implementasi sirkuit Jerk dalam sistem keamanan komunikasi.



Gambar 11. Skema Sirkuit Jerk untuk sistem keamanan komunikasi

KESIMPULAN

Dalam tulisan ini, telah dilakukan analisis terhadap sirkuit Jerk sehingga dapat ditentukan parameter yang dapat menghasilkan kondisi sinyal chaos. Selain itu, telah diperoleh bahwa sirkuit Jerk dapat disinkronisasi dengan metode kopling *unidirectional* dengan tingkat *error* yang kecil. Berdasarkan sinkronisasi yang diperoleh, sirkuit Jerk dapat digunakan sebagai *masking* data untuk sistem keamanan komunikasi. Semua simulasi sirkuit telah diuji menggunakan program MATLAB dan simulasi sirkuit menggunakan MultiSIM. Akhirnya, hasil simulasi menunjukkan efektivitas dari skema yang diusulkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Zhang, "Chaos Synchronization and Its Application to Secure Communication," PhD Thesis, University of Waterloo, Canada, 2010.
- [2] H. Jaenudin., A. Sambas., Halimatussadiyah., dan M. Sanjaya W.S., " Analisis *Chaotic* Sistem Dinamika Tiga Bandul dan Tiga pegas," *Prosiding Konferensi Fisika I*, vol. 1, no. 1, pp. 46-48, ISSN 2301-5284, 2012.
- [3] K. Nakajima, and Y. Sawada., " Experimental Studies on the Weak Coupling of Oscillatory Chemical Reaction Systems," *J. Chem. Phys.*, vol. 72, no. 4, pp. 2231–2234, 1979.
- [4] J. L. Hindmarsh, and R. M. Rose, "A Model of Neuronal Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. Vol. 221, No. 1222, pp. 87-102, 1984.
- [5] Ch. K. Volos, N. G. Bardis, I. M. Kyprianidis, and I. N. Stouboulos, "Implementation of Mobile Robot by Using Double-Scroll Chaotic Attractors," *WSEAS Recent Researches in Applications of Electrical and Computer Engineering*, Vouliagmeni Beach, Athens, Greece., pp. 119–124, 2012.
- [6] Ch. K. Volos, I. M. Kyprianidis and I. N. Stouboulos., " Motion Control of Robots Using a Chaotic Truly Random Bits Generator," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 5, no. 2, pp. 6–11, 2012.
- [7] J. C. Sprott., " Dynamical Models of Love," *Nonlinear Dyn. Psych. Life Sci.*, vol. 8, pp. 303–314, 2004.

- [8] M. Sanjaya W. S., I. Mohd, M. Mamat, and Z. Salleh., “Mathematical Model of Three Species Food Chain Interaction with Mixed Functional Response,” *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 9, pp. 334–340, 2012.
- [9] M. Sanjaya W. S., M. Mamat, Z. Salleh., I. Mohd, and N. M. N. Noor., “Numerical Simulation Dynamical Model of Three Species Food Chain with Holling Type-II Functional Response,” *Malaysian Journal of Mathematical Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2011.
- [10] Ch. K. Volos, I. M. Kyprianidis, and I. N. Stouboulos, “Synchronization Phenomena in Coupled Nonlinear Systems Applied in Economic Cycles,” *WSEAS Trans. Syst.*, vol. 11, no. 12, pp. 681–690, 2012.
- [11] T. L. Carroll, “A Simple circuit demonstrating regular and synchronized chaos,” *Am J Phys.* vol. 63, no.4, pp. 377-379, 1995.
- [12] C.K. Volos, I.M. Kyprianidis, and I.N. Stouboulos, “Synchronization of two Mutually Coupled Duffing – type Circuits,” *International Journal of Circuit, Systems and Signal processing.* vol.1, no. 3, pp. 274-281, 2007.
- [13] M. Mamat, M. Sanjaya W.S, and D. S. Maulana, “Numerical Simulation Chaotic Synchronization of Chua Circuit and Its Application for Secure Communication,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1 – 10, 2013.
- [14] M. Mamat, M. Sanjaya.W.S, Z. Salleh, N.M Mohamad Noor, and M. F.Ahmad, “Numerical Simulation of Unidirectional Chaotic Synchronization of Non-Autonomous Circuit and Its Application for Secure Communication,” *Adv. Studies Theor. Phys.*, vol. 6, no. 10, pp. 497 – 509, 2012.
- [15] M. Mamat, M., Z. Salleh., M. Sanjaya W. S., and I. Mohd, “The Dynamics of Chaotic FitzHugh-Nagumo Neuronal Systems,” *Applied Mathematical Sciences*, vol 6. no. 38, pp. 1863 – 1876, 2012.
- [16] M. Sanjaya, W. S., M. Mamat, Z. Salleh, and I Mohd., “Bidirectional Chaotic Synchronization of Hindmarsh-Rose Neuron Model,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 5, no. 54, pp. 2685 – 2695, 2011.
- [17] A. Sambas, M. Sanjaya W.S, and Halimatussadiyah, “Unidirectional Chaotic Synchronization of Rossler Circuit and Its Application for Secure Communication,” *WSEAS Trans. Syst.*, vol. 11, no. 9, pp. 506-515, 2012.
- [18] L. M. Pecora, and T. L. Carroll, “Synchronization in Chaotic Systems,” *Physical Review Letters*, vol. 64, pp. 821–825, 1990.
- [19] K. M. Cuomo, and A. V. Oppenheim, “Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications,” *Phys. Rev Lett.*, vol. 71, no. 1, pp. 65-68, 1993.
- [20] J. Z. Zhang, A. B. Wang, J. F. Wang, and Y. C. Wang, “Wavelength division multiplexing of chaotic secure and fiber-optic communications,” *Opt. Express.* vol. 17, no. 8, pp. 6357–6367, 2009.
- [21] M.J. Rodriguez, R.J. Reategui, and A.N. Pisarchik., “Secure Communication Based on Chaotic Cipher and Chaos Synchronization,” *Discontinuity, Nonlinearity and Complexity*, vol. 1, pp. 57-68, 2012.
- [22] F. Rogister, A. Locquet, D. Pieroux, M. Sciamanna, O. Deparis, P. Mégret, and M. Blondel., “[Secure communication scheme using chaotic laser diodes subject to incoherent optical feedback and incoherent optical injection.](#)” *Optics Letters.* vol. 26, no. 19, pp. 1486-1488, 2001.
- [23] J. C. Sprott, “Simple Chaotic Systems and Circuits,” *Am. J. Phys.*, vol. 68, pp. 758–763, 2000.
- [24] Q. H. Alsafasfeh, and M. S. Al-Arni., A New Chaotic Behavior from Lorenz and Rossler Systems and Its Electronic Circuit Implementation., *Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 101–105, 2011.
- [25] A. Wolf., “Quantity Chaos with Lyapunov Exponents,” *Chaos, Princeton University Press*, pp. 273-290, 1986.
- [26] R. Gencay, and Dechert W.D., “An Algorithm For The n-Lyapunov Exponents Of An n-Dimensional Unknown Dynamical System,” *Physica D*, vol. 59, pp.142-157, 1992.
- [27] M. Sano, and Y. Sawada., “Measurement of the Lyapunov Spectrum From a Chaotic Time Series,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, pp. 1082 – 1085, 1985.

- [28] Z. Jing, D. Xu, Y. Chang, L. Chen, “ Bifurcations, Chaos, and System Collapse in a Three Node Power System, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,” vol.25, no.6, pp. 443-461, 2003.
- [29] V. V. Bykov, “ On bifurcations Leading to Chaos in Chua's Circuit,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*. vol 8, no. 4, pp. 685-699, 1998.