

Kendali Pergerakan Sumbu Pitch Sistem *Twin Rotor Multi Input Multi Output* (TRMS) dengan Menggunakan Metode *Pole Placement State Feedback*

Anisa Ulya Darajat^{1*}, Swadexi Istiqphara², Afida Nur Faida³

¹Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung

²Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sumatera

³Dinas Komunikasi dan Informatika, Kabupaten Tulang Bawang Lampung

*anisa.ulya@eng.unila.ac.id

ABSTRACT

Twin Rotor Multi Input Multi Output System (TRMS) is an aerial vehicle prototype which is used to test the control system in controlling the air vehicle. TRMS has characteristics similar to helicopters which are non-linear and multi-input multi-output (MIMO) systems. The design of the control system is a challenge for researchers with the aim of the vehicle being able to move according to the specified target, including the rotational movement that maintains the stability of the vehicle when navigating. Based on these problems, this paper will design a TRMS movement control system on the pitch axis. The method used in this research is the linear pole placement state feedback control system method which is obtained by placing the plant poles to the desired poles. The results obtained show that the pitch movement can be controlled without steady state error but there is an overshoot in the opposite direction to the target during the rise time, based on the three tests, the best settling time value is 0.46s with an overshoot rise time of 0.19rad.

Keywords : pole placement, twin rotor, linear control, MIMO system, state feedback

INTISARI

Twin Rotor Multi Input Multi Output System (TRMS) adalah sebuah purwarupa wahana udara yang digunakan untuk uji coba sistem kendali dalam mengendalikan wahana udara. TRMS memiliki karakteristik yang serupa dengan helikopter yang merupakan sistem non linear dan multi input multi output (MIMO). Perancangan sistem kendali menjadi tantangan untuk para peneliti dengan tujuan wahana dapat digerakan sesuai dengan target yang ditentukan, termasuk pada pergerakan rotasi yang menjaga kestabilan wahana ketika bernavigasi. Berdasarkan permasalahan tersebut, dalam paper ini akan dirancang sistem kendali pergerakan TRMS pada sumbu pitch. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode sistem kendali linear pole placement state feedback yang diperoleh dengan menempatkan kutub plant ke kutub yang diinginkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan pergerakan pitch dapat dikendalikan dengan tanpa error steady state namun terdapat overshoot yang berlawanan arah dengan target ketika rise time, berdasarkan dari ketiga pengujian diperoleh nilai settling time yang terbaik yaitu pada 0.46s dengan overshoot rise time sebesar 0.19rad.

Kata kunci: pole placement, twin rotor, linear control, MIMO system, state feedback.

I. PENDAHULUAN

Twin rotor multi input multi output (TRMS) adalah sebuah sistem yang pada dasarnya adalah model purwarupa dari helikopter yang dapat berputar secara horizontal dan vertikal, namun lebih disederhanakan dibandingkan helikopter [1][2][3]. sehingga dapat dikatakan bahwa sistem ini mempunyai 2 derajat kebebasan. Karakteristik Twin rotor MIMO system (TRMS) memiliki efek

coupling antara dinamika rotor dengan dinamika body [4].

Pemodelan dan kendali TRMS masih menjadi tantangan yang perlu diselesaikan oleh para peneliti, hal tersebut dikarenakan TRMS sangat nonlinear dan sangat keterkaitan antara satu subsistem dengan subsistem lainnya [5]. Salah satu tantangan dalam sistem kendali adalah dapat

menggerakkan TRMS menuju target posisi sudut yang diinginkan dan mempertahankannya [6]. Meskipun secara umum terdapat kesamaan antara TRMS dan helikopter, namun terdapat juga beberapa perbedaan dalam bagaimana cara mengendalikan TRMS dengan wahana udara helikopter, beberapa perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Perbedaan utama antara helikopter dan TRMS [7]

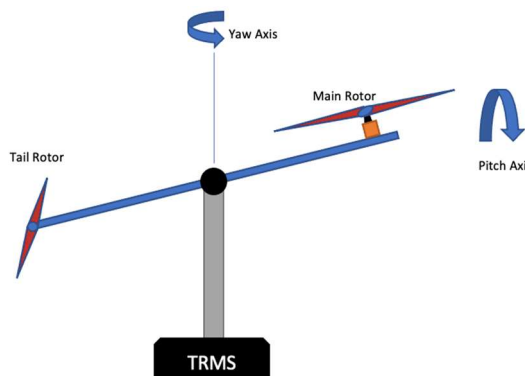
	TRMS	HELICOPTER
Lokasi Titik Pivot	Pertengahan antara dua rotor	Rotor utama
Kendali Pitch	Kontrol kecepatan pada rotor utama	Kendali melalui kolektif pitch
Pengendali Yaw	Kecepatan rotor bagian ekor	Sudut pitch pada rotor ekor
Kontrol Cyclical Terbang	Tidak ada	Ada
	Tidak	Ya

Penelitian yang sudah pernah dilakukan terkait sistem TRMS ini diantaranya adalah pada [3] yang menggunakan metode sistem kendali optimal untuk mengendalikan setiap sumbu TRMS yaitu pada sumbu horizontal dan vertikal, metode pemisahan sistem kendali setiap sumbu pergerakan ini disebut juga sebagai *de-coupling control*. Pengendalian dengan menggunakan PSO PID juga pernah dilakukan oleh [8], metode PSO digunakan untuk mencari konstanta *gain* PID yang terbaik. Hasil yang diperoleh menunjukkan PID mampu mengendalikan TRMS untuk mengikuti target yang ditentukan, namun masih terdapat *overshoot* dan fenomena *chattering* yaitu osilasi pada saat sistem sudah pada kondisi *steady state*. Penelitian lainnya terkait kendali sudut *pitch* TRMS pernah dilakukan oleh [6] dengan menggunakan metode PID dan invers model. Invers model diperoleh dengan menggunakan

penelitian PSO, beberapa teknik yang digunakan diantaranya adalah dengan menerapkan invers model sebagai feedforward tambahan PID dan juga sebagai feedback control. Hasil yang diperoleh menunjukkan metode *PID-Invers Model Based Feedback Control* menghasilkan grafik pergerakan yang terbaik yaitu dengan waktu *settling* sekitar 2s.

II. PEMODELAN SISTEM

TRMS dikembangkan oleh *Feedback Instruments Limited* dengan bentuk TRMS seperti pada Gambar 1 dimana terdapat 1 buah baling-baling arah vertikal sebagai *tail-rotor* dan baling-baling lainnya arah horizontal yang disebut sebagai rotor utama. Parameter sistem TRMS ditunjukkan pada Tabel 2. Pada axis-X menggambarkan yaw axis, Y-axis menggambarkan pitch axis. Karena itu, bidang horizontal menjadi bidang YZ dan bidang vertikal menjadi bidang XZ. TRMS akan seimbang ketika motor dimatikan seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik TRMS [2]

Tabel 2. Karakteristik Parameter TRMS [9]

Parameter	Nilai
Maksimum tegangan kerja input	+/- 10 V
Panjang balok	0.49 m
Massa motor DC utama pada rotor utama	0.228 kg
Massa motor DC akhir pada rotor akhir	0.206 kg

Pada penelitian ini menggunakan model fungsi transfer pada TRMS dalam gerak vertikal dengan menggunakan parameter model yang stabil dan akurat. Model fungsi transfer pada TRMS dalam gerak vertikal berdasarkan [9][6] adalah sebagai berikut:

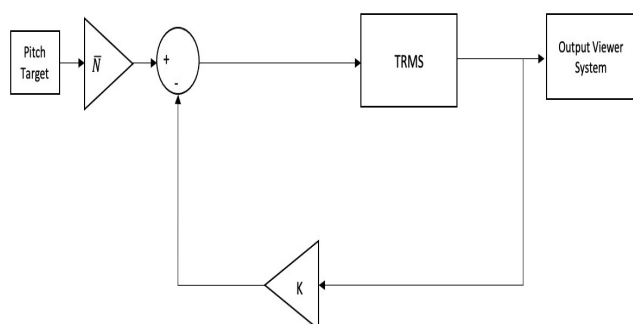
$$H_v(z) = \frac{-0.7428z^3 - 0.5711z^2 + 0.3548z + 0.7871}{z^4 - 0.0049z^3 - 0.0018z^2 - 0.0015z + 0.0019} \dots (1)$$

Dan agar analisis dapat dilakukan secara kontinyu, maka Persamaan (1) harus diubah terlebih dahulu ke fungsi alih kontinyu dan state space. Hasil konversi ke waktu kontinyu ditunjukkan pada Persamaan (2) dan (3).

$$H(s) = \frac{-5772s^3 + 5.369 \times 10^5 s^2 + 4.806 \times 10^7 s - 3.315 \times 10^8}{s^4 + 3.91.1s^3 + 8.193 \times 10^4 s^2 + 8.464 \times 10^6 s + 3.76 \times 10^8} \dots (2)$$

III. PERANCANGAN SISTEM KENDALI

Metode PPSF yang diusulkan dalam manuskrip ini adalah metode linear yang menggunakan persamaan matematika *plant* yang dilinearisasi berupa fungsi alih agar dapat digunakan untuk merancang sistem kendalinya. Metode PPSF bekerja dengan menempatkan kutub TRMS ke fungsi alih lain yang diinginkan dengan tujuan agar memiliki karakteristik sesuai fungsi alih yang diinginkan [10]. Adapun diagram blok dari sistem kendali PPSF dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok PPSF

Karakteristik sistem dari suatu plant dapat dilihat dengan menggunakan persamaan (2) berikut ini [11][12][13]:

$$s_{1,2} = -\xi \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (3)$$

dengan:

$$\xi = \frac{-\ln(\%OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS/100)}} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{4}{\xi \omega_n}$$

untuk orde > 2 dijumlahkan dengan T_s dari pole yang lain

Dimana ζ adalah *damping ratio* atau rasio redaman dengan ketentuan $\zeta=1$ teredam kritis, $\zeta>1$ teredam lebih, $0<\zeta<1$ kurang teredam dan $\zeta=0$ tidak teredam. ω adalah frekuensi natural. T_s adalah *settling time* atau waktu mencapai target.

Jika orde plant yang akan dikendalikan merupakan plant orde lebih dari dua, maka karakteristik sistem juga harus berada pada orde yang sama. Untuk melakukan analisis faktor redaman dan lainnya, maka dapat dilakukan dengan membagi persamaan karakteristik menjadi tiap dua orde.

Adapun persamaan sinyal kendali u adalah sebagai berikut [11]:

$$u = N_u r - K(x - N_x r) \quad (5)$$

$$= -Kx + (N_u + KN_x)r$$

Dapat disederhanakan menjadi

$$u = -Kx + \bar{N}r \quad (6)$$

Dengan:

r adalah referensi, dan $\bar{N} = N_u + KN_x$ nilai N_u dan N_x didapat dari penyelesaian persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G \\ H & J \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

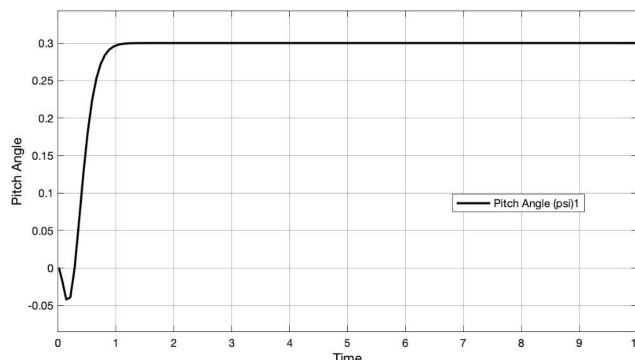
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk menguji rancangan sistem kendali yang diusulkan untuk diterapkan pada sistem TRMS, dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak pada komputer. Pengujian dilakukan dengan dilakukan perubahan pada parameter pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Pengujian

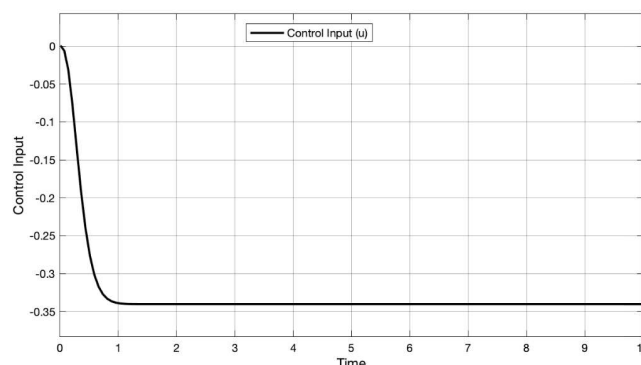
No	ζ	ω (rad /s)	T_s (s)	<i>pole</i>	<i>Gain</i> K
1	0.95 0.97	10	0.8 41	-9.5±3.12i -9.7±2.43i	-352.69 -81361 -8460160 - 37599000 0
2	0.95 0.97	50	0.1 68	-48.5±12i - 47.5±15.6i	-199 -67715 -7984000 - 36975000 0
3	5 2	100 75	0.4 6	-10.1 -989.9 -20.1 -279.9	908.9 233695 161000 -319749999

Perubahan parameter pengujian dilakukan untuk melihat pengaruh dari perubahan frekuensi natural terhadap respon sistem sehingga akan diketahui berapa nilai frekuensi natural yang tepat agar TRMS dapat dikendalikan. Adapun performa yang diharapkan dari sistem kendali yang dirancang adalah kecepatan TRMS menuju setpoint dan minimal *overshoot* atau *undershoot*. Target sudut yang harus dicapai oleh TRMS adalah 0.3 rad.



Gambar 3. Luaran Sistem Pengujian 1

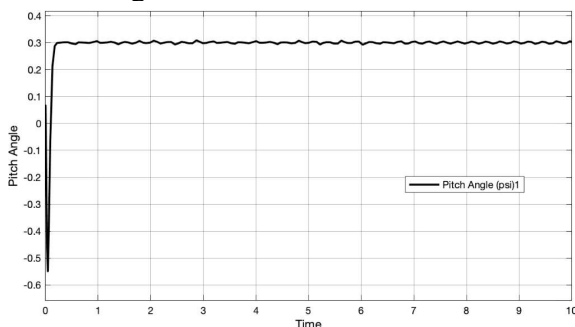
Hasil pengujian 1 dengan frekuensi natural (ω) sebesar 10 rad/s ditunjukkan pada Gambar 3. Dapat dilihat pada gambar tersebut sistem bergerak menuju target sudut dengan *settling time* sesuai pole target yaitu 0.841s. Akan tetapi masih terdapat *overshoot* saat TRMS akan menuju target (*rise time*) sebesar 0.04 rad, hal ini dalam implementasinya akan menyebabkan TRMS berputar kearah berlawanan, namun pada hasil percobaan 1 ini menunjukkan nilai sudut overshoot masih aman untuk TRMS karena memiliki nilai yang kecil.



Gambar 4. Sinyal kendali Percobaan 1

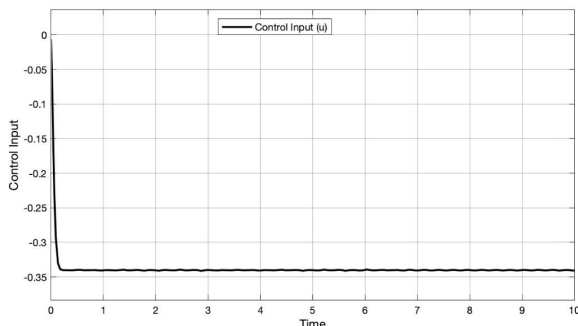
Sinyal kendali pada percobaan 1 ditunjukkan pada Gambar 4, terlihat bahwa sisyan kendali menunjukkan respon yang terus meningkat hingga pada kondisi *steady state* pada nilai 0.34. sinyal kendali yang demikian dinilai baik karena pada implementasi nya akan hemat sumber daya, karena hanya memberikan sinyal kendali sesuai kebutuhan sistem.

Pada Gambar 5 menunjukkan pengujian 2 dengan nilai frekuensi natural sebesar 100 rad/s. nilai 100 rad/s merupakan kisaran nilai frekuensi natural awal yang dimiliki sistem TRMS. Hasil pengujian menunjukkan performa sistem bergerak dengan sangat cepat dengan *settling time* sebesar 0.168. namun permasalahan utama terlihat yaitu sistem mengalami overshoot ketika akan menuju target hingga 0.5 rad kearah berlawanan dari target meskipun dalam waktu yang sangat cepat yaitu 0.2s. Nilai *overshoot* ini tergolong sangat besar dan hal ini dikhawatirkan ketika implementasi akan menyebabkan ketidakstabilan karena wahana terlalu miring.



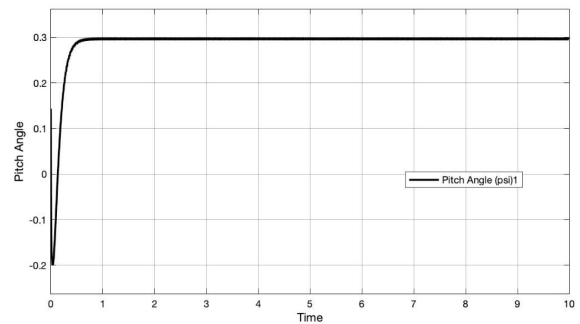
Gambar 5. Luaran Sistem Pengujian 2

Selain itu performa sistem juga menunjukkan terdapat osilasi ketika *steady state*. Hal ini akan menyebabkan borosnya sumber daya yang digunakan karena TRMS melakukan perilaku yang tidak perlu yang juga membutuhkan sinyal kendali dan sumber daya yang seharusnya tidak perlu dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



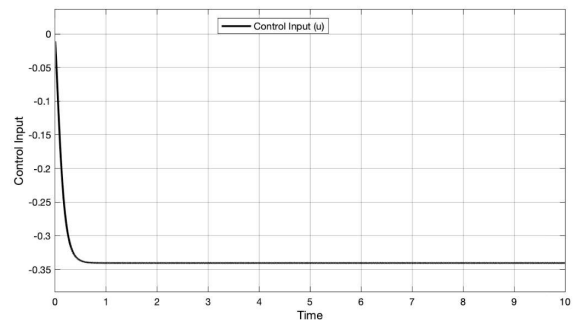
Gambar 6. Sinyal kendali Percobaan 2

Pada Gambar 7 merupakan pengujian dengan mengubah nilai frekuensi natural dan rasio redaman. Hal ini bertujuan untuk mencari respon terbaik antar pengujian 1 dan 2. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa respon sistem dapat menuju target sudut dengan cepat yaitu 0.46s. Namun masih terdapat overshoot saat TRMS akan mulai bergerak, besar overshoot hingga 0.2rad berlawanan arah dari target. Nilai ini meskipun cukup besar namun masih dalam batas toleransi.



Gambar 7. Luaran Sistem Pengujian 3

Respon sistem hasil pengujian menunjukkan masih terdapat osilasi atau fenomena *chattering* seperti yang ditunjukkan pada luaran sistem pada Gambar 7 dan sinyal kendali pada Gambar 8, namun radius osilasi atau *chattering* masih tergolong kecil.



Gambar 8. Sinyal kendali Percobaan 3

V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan pembahasan sistem kendali posisi sudut TRMS dengan menggunakan metode *pole placement state feedback* menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu mengendalikan TRMS menuju target sudut dengan baik. Namun dikarenakan sistem

yang memiliki dinamika yang sangat cepat, hasil simulasi menunjukkan fenomena yang tidak diinginkan yaitu terjadinya *overshoot* sesaat setelah dijalankan. Dari hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sistem TRMS dapat dikendalikan dengan meminimalkan *overshoot* yaitu dengan menurunkan frekuensi natural, namun konsekuensinya adalah meningkatnya *settling time* yang menunjukkan sistem bergerak menjadi lebih lambat. Berdasarkan ketiga pengujian ini maka performa sistem terbaik terdapat pada pengujian ke tiga dimana TRMS masih dapat bergerak cepat yaitu 0.46s mencapai target dan *overshoot* 0.19rad berlawanan arah dengan target. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat improvisasi metode *pole placement state feedback*, agar dapat mengatasi *overshoot* yang tinggi saat *rise time* meskipun dengan *settling time* yang cepat. Sehingga performa sistem TRMS tidak menurun.

REFERENSI

- [1] Feedback Instruments Ltd., "Twin Rotor MIMO," p. 2, 2013.
- [2] Feedback Instruments Ltd, "Twin Rotor MIMO System Control Experiments 33- 949S Laboratory Manual," U.K., p. 46, 2005.
- [3] P. Wen and Y. Li, "Twin rotor system modeling, de-coupling and optimal control," in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2011*, 2011, pp. 1839–1842. doi: 10.1109/ICMA.2011.5986259.
- [4] L. M. Belmonte, R. Morales, A. Fernández-Caballero, and J. A. Somolinos, "Robust decentralized nonlinear control for a twin rotor MIMO system," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.3390/s16081160.
- [5] A. Tastemirov, A. Lecchini-Visintini, and R. M. Morales-Viviescas, "Complete dynamic model of the Twin Rotor MIMO System (TRMS) with experimental validation," *Control Eng. Pract.*, vol. 66, no. September 2013, pp. 89–98, 2017, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.06.009.
- [6] S. F. Toha and M. O. Tokhi, "PID and inverse-model-based control of a twin rotor system," *Robotica*, vol. 29, no. 6, pp. 929–938, 2011, doi: 10.1017/S0263574711000154.
- [7] R. G. Tiwalkar, S. S. Vanamane, S. S. Karvekar, and S. B. Velhal, "Model predictive controller for position control of twin rotor MIMO system," *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPCSI 2017*, pp. 952–957, 2018, doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8391852.
- [8] P. Biswas, R. Maiti, A. Kolay, K. Das Sharma, and G. Sarkar, "PSO based PID controller design for twin rotor MIMO system," *Int. Conf. Control. Instrumentation, Energy Commun. CIEC 2014*, pp. 56–60, 2014, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959049.
- [9] S. F. Toha, I. Abd Latiff, M. Mohamad, and M. O. Tokhi, "Parametric modelling of a TRMS using dynamic spread factor particle swarm optimisation," *11th Int. Conf. Comput. Model. Simulation, UKSim 2009*, pp. 95–100, 2009, doi: 10.1109/UKSIM.2009.109.
- [10] K. Ogata, "Modern Control Engineering," *Indian Pediatr.*, vol. 39, no. 12, p. 894, 2010, Accessed: Dec. 07, 2021. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1100013>
- [11] F. Mangkusasmito and T. H. Nugroho, "Desain Sistem Kendali Umpan Balik State Pada Kasus Kontinyu Untuk Meja Kerja Cnc," *Gema Teknol.*, vol. 20, no. 2, p. 32, 2019, doi: 10.14710/gt.v20i2.22641.
- [12] L. S. Tung and T. F. Edgar, "STUDY OF POLE PLACEMENT IN LINEAR CONTROL DESIGN.," in *Proceedings of the American Control Conference*, 1984, vol. 1, pp. 518–523. doi: 10.23919/acc.1984.4788433.
- [13] L. Yan and M. Fei, "Design of state-feedback controller by pole placement for a coupled set of inverted pendulums," in *Proceedings - IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2011*, 2011, vol. 3, pp. 69–73. doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037857.