

DESAIN BAND PASS FILTER DENGAN FREKUENSI CUT-OFF 1 KHz DAN 100 KHz UNTUK SISTEM ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)

Ari Bangkit Sanjaya Umbu¹⁾

¹⁾Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, NTT, Indonesia

Corresponding author : Ari Bangkit Sanjaya Umbu

E-mail : aribangkit.sanjaya@gmail.com

Diterima 24 Januari 2023, Direvisi 03 Maret 2023, Disetujui 06 Maret 2023

ABSTRAK

Electrical Impedance Tomography (EIT) merupakan teknik pencitraan *non-invasif* yang merekonstruksi distribusi konduktivitas dari suatu objek. Hasil rekonstruksi citra dengan teknik EIT sangat bergantung pada kemampuan sistem instrumentasinya untuk menghasilkan data yang akurat. Rangkaian filter merupakan salah satu bagian terpenting dalam sistem EIT. Pada penelitian ini telah dirancang dan disimulasikan empat jenis rangkaian band-pass filter orde 4 yang menggunakan koefisien Butterworth, unity gain, dan topologi *Sallen-Key* dengan frekuensi *cut-off* 1 kHz dan 100 kHz. Hasil pengujian keempat rangkaian BPF menunjukkan bahwa keempat rangkaian mampu meloloskan sinyal dengan frekuensi antara 1 kHz hingga 100 kHz.

Kata kunci: *band-pass filter, electrical Impedance Tomography; frequency.*

ABSTRACT

Electrical impedance tomography (EIT) is a low-cost non-invasive imaging technique that reconstructs the conductivity distribution of an object. Image reconstruction results with the EIT technique depend on the instrumentation system's ability to produce accurate data. The filter circuit is one of the most important parts to build EIT system. This research has been designed and simulated four types of 4th-order band-pass filter circuits which are using the Butterworth coefficient, unity gain, and Sallen-Key topology with cut-off frequency 1kHz and 100 kHz. The test results of the four BPF circuits show that circuits are able to pass signals with frequencies between 1 kHz to 100 kHz.

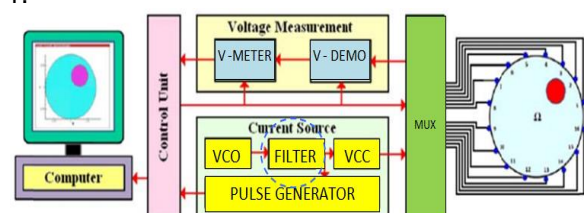
Keywords: band-pass filter; electrical Impedance Tomography; frequency.

PENDAHULUAN

Electrical Impedance Tomography (EIT) merupakan suatu teknik pencitraan non-invasif yang didasarkan pada sifat konduktivitas listrik suatu objek (Mansouri *et al.*, 2021, Gallardo and García, 2022, dan Hamilton and Hauptmann, 2018). Sistem EIT merupakan penggabungan antara *Electrical Resistance Tomography* (ERT) and *Electrical Capacitance Tomography* (ECT) (Padilha and Zangl, 2020). Prinsip dasar EIT yaitu menginjeksikan arus ke objek melalui sepasang elektroda dan distribusi konduktivitas diperoleh dengan mengukur tegangan pada elektroda-elektroda yang diletakan pada permukaan objek (Ke *et al.*, 2022 dan Sarode *et al.*, 2012). Aplikasi EIT sangat luas seperti pada bidang geofisika maupun medis (Bera, 2018 dan Harikumar *et al.*, 2013). Pada bidang medis, EIT dapat digunakan untuk pemantauan fungsi paru-paru, fungsi jantung, fungsi saraf, kuantitas air pada paru-paru dan mendeteksi kanker payudara (Teschner *et al.*, 2013 dan Babikir Adam and Sathesh, 2021). Teknik pencitraan

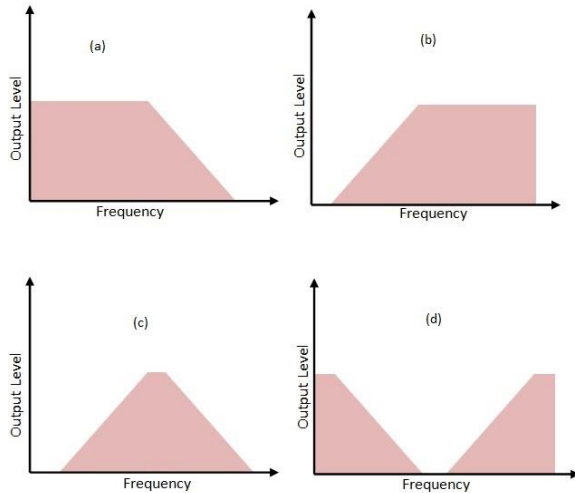
EIT memiliki kelebihan dibandingkan teknik citra lainnya seperti: biaya pembuatan yang murah, sederhana, dan ringkas. (Singh *et al.*, 2012, Sebu, 2017 dan Nascimento *et al.*, 2021)

Salah satu bagian penting dalam perancangan sistem EIT adalah filter. Filter merupakan rangkaian yang digunakan untuk menghalangi sinyal yang berada diluar rentang frekuensi yang ditetapkan (Pactitis, 2007). Rentang frekuensi dari beberapa aplikasi EIT yang telah dikembangkan berada pada 1 kHz – 100 kHz (Mansouri *et al.*, 2021 dan Basak and Wahid, 2022). Posisi filter dalam rangkaian sistem EIT ditunjukkan pada gambar 1.



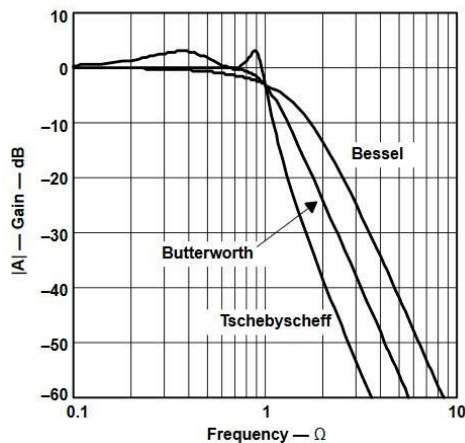
Gambar 1. Konfigurasi sistem EIT (Khalighi *et al.*, 2014)

Berdasarkan respon dalam domain frekuensi, filter dapat dibedakan menjadi empat (Winder, 2002), yaitu: *Low Pass Filter* (LPF), *High Pass Filter* (HPF), *Band pass Filter* (BPF), *Band stop Filter* (BSF). Respon frekuensi LPF, HPF, BPF dan BSF ditunjukkan pada Gambar 2.



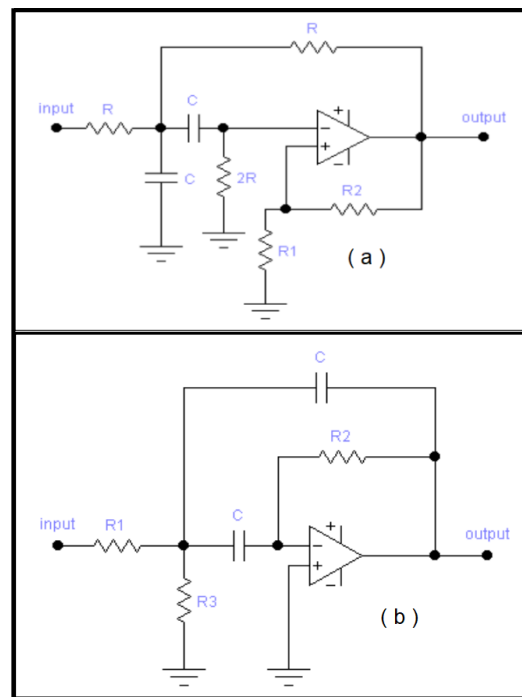
Gambar 2. Respon frekuensi filter. a) *Low Pass Filter*, b) *High Pass Filter*, c) *Band pass Filter*, d) *Band Stop Filter*

Sementara itu, berdasarkan koefisien yang digunakan, filter dibedakan menjadi tiga tipe (Pactitis, 2007), yaitu: *Butterworth filter*, merupakan tipe filter dengan koefisien yang mampu memberikan hasil *passband* yang hampir rata, *Chebyshev filter* merupakan tipe filter dengan koefisien yang mampu mempertajam *roll-off*, namun filter tipe ini menghasilkan riak (*ripple*) pada *passband*-nya, dan *Bessel Filter*, merupakan tipe filter dengan koefisien yang mampu melinearkan fase respon untuk jenis *Low Pass filter* hingga frekuensi *cut off*-nya. Perbandingan Respon Gain untuk masing-masing tipe koefisien filter ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan respon Gain (*Gain responses*) (Mancini, 2002)

Pada perancangan filter aktif juga dikenal dua topologi dasar yang biasa diimplementasikan, yaitu *Sallen-Key* dan *Multiple Feedback* (MFB). *Sallen-Key* merupakan topologi dasar yang biasa diaplikasikan pada perancangan filter yang membutuhkan akurasi gain yang tinggi, *unity gain* (tanpa penguatan) dan hanya memerlukan *quality factor* (*Q*) yang rendah. Sedangkan *Multiple Feedback* (MFB) merupakan topologi dasar yang biasa diaplikasikan pada perancangan filter yang membutuhkan penguatan tinggi dan memerlukan *quality factor* (*Q*) yang tinggi (Mancini, 2002 dan Olalekan and Toluwani, 2017). Skema rangkaian BPF dengan menggunakan topologi *Sallen-Key* dan *Multiple Feedback* (MFB) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian *Band pass Filter* dengan topologi: a) *Sallen-Key*, b) *Multiple-Feedback* (MFB) (Abdul, 2014)

Pada penelitian ini dirancang *Band-pass filter* (BPF) orde 4 dengan topologi *Sallen-Key* tanpa penguatan (*unity gain*), koefisien *Butterworth* dengan frekuensi 1 kHz dan 100 kHz untuk mendukung sistem EIT.

METODE PENELITIAN

Rangkaian BPF orde 4 yang dirancang merupakan gabungan antara rangkaian *Low Pass Filter* (LPF) orde 2 dan *High Pass Filter* (HPF) orde 2. Pada tahap awal dilakukan perhitungan terhadap nilai resistor dan kapasitor yang akan digunakan dengan menggunakan tetapan nilai $a_1 = 1,4142$ dan

$b_1 = 1$ (Mancini, 2002). Penentuan nilai resistor (R_1 dan R_2) dan kapasitor kedua (C_2) pada rangkaian LPF mengacu pada persamaan (1) dan (2). Sedangkan nilai kapasitor pertama (C_1) diatur sebesar 1×10^{-9} F.

$$C_2 \geq C_1 \cdot \frac{4b_1}{a_1^2} \quad \dots(1)$$

$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \mp \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2} \quad \dots(2)$$

Pada rangkaian HPF, nilai kapasitor yang digunakan ditetapkan sebesar $C_3 = C_4 = C = 1 \times 10^{-9}$ F dan penentuan nilai resistor (R_3 dan R_4) untuk rangkaian HPF mengacu pada persamaan (3) dan (4).

$$R_3 = \frac{a_1}{4\pi f_c C b_1} \quad \dots(3)$$

$$R_4 = \frac{1}{\pi f_c C a_1} \quad \dots(4)$$

Selanjutnya dilakukan desain dan pengujian respon frekuensi rangkaian BPF secara simulasi dengan menggunakan software Orcad Pspice 9.2. Desain BPF secara simulasi menggunakan komponen IC Op-Amp LF412 dan LM741. Dalam penelitian ini didesain empat jenis rangkaian BPF menggunakan dan mengkombinasikan kedua IC tersebut. BPF pertama, didesain dengan menggunakan empat IC LM741 sebagai komponen filter dan buffer amplifiernya. BPF kedua, didesain dengan menggunakan empat IC LF412 sebagai komponen filter dan buffer amplifiernya. BPF ketiga, didesain dengan menggunakan empat IC LM741 sebagai komponen filter dan IC LF412 sebagai komponen buffer amplifiernya. BPF keempat, didesain dengan menggunakan empat IC LF412 sebagai komponen filter dan IC LM741 sebagai komponen buffer amplifiernya.

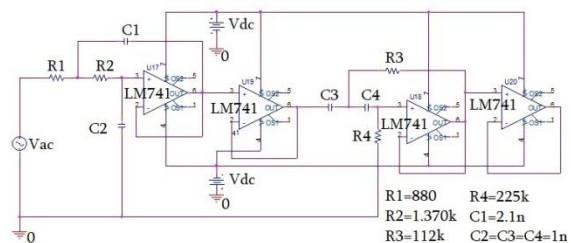
HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa rangkaian *Band Pass Filter* (BPF) orde 4 dengan frekuensi *cut-off* 1 kHz dan 100 kHz merupakan gabungan antara rangkaian *Low Pass Filter* (LPF) orde 2 dengan frekuensi *cut-off* 100 kHz dan rangkaian *High Pass Filter* (HPF) orde 2 dengan frekuensi *cut-off* 1 kHz. Hasil perhitungan dan pendekatan nilai komponen-komponen pasif yang dibutuhkan untuk mendesain BPF orde 4 ditunjukkan pada Tabel 1. Pendekatan terhadap nilai hasil perhitungan dilakukan untuk menyesuaikan dengan ketersediaan komponen di pasaran.

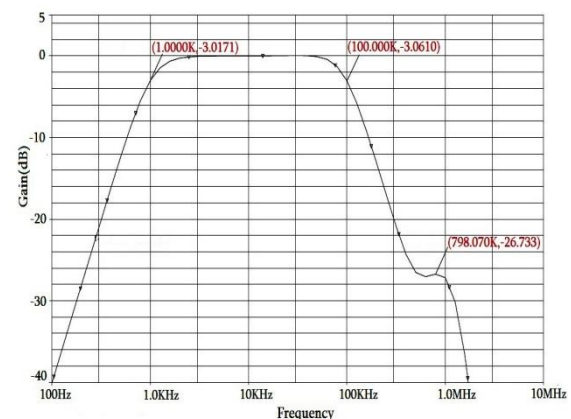
Tabel 1. Hasil perhitungan dan pendekatan nilai komponen pasif yang dibutuhkan BPF orde 4 (LPF orde 2 dan HPF orde 2)

LPF	Kapasitor (F)	C_1	1×10^{-9}
		C_2	2.1×10^{-9}
Resistor (Ω)	R_1	880	
	R_2	1370	
HPF	Kapasitor (F)	C_3	1×10^{-9}
		C_4	1×10^{-9}
	Resistor (Ω)	R_3	112×10^3
		R_4	225×10^3

Tahapan selanjutnya dilakukan desain rangkaian dan pengujian *Band Pass Filter* (BPF) dengan menggunakan software Orcad Pspice 9.2. Hasil desain rangkaian dan pengujian BPF ditunjukkan pada Gambar 5-12 secara berturut-turut.



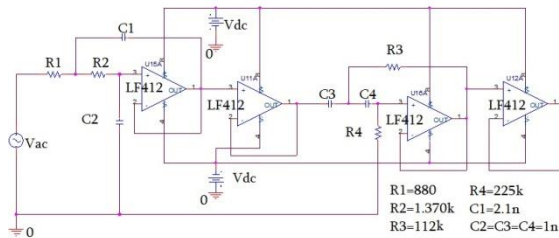
Gambar 5. Rangkaian band pass filter hasil desain dengan empat IC Op-Amp LM741



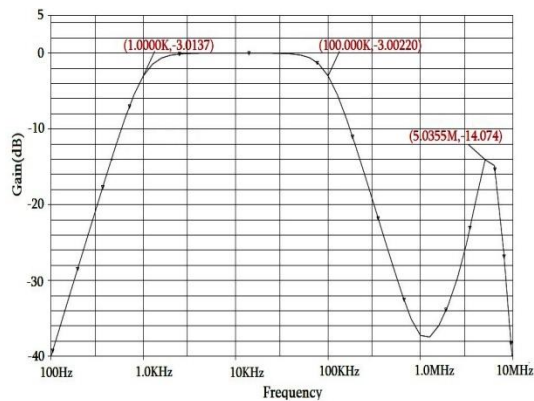
Gambar 6. Respon Frekuensi band pass filter hasil desain dengan empat IC Op-Amp LM741

Uji coba BPF pertama dengan menggunakan IC LM741 sebagai komponen filter dan buffer amplifiernya menunjukkan filter memiliki gain -3.0171 dB pada frekuensi *cut-off* bawah 1 kHz dan gain -3.0610 dB pada frekuensi *cut-off* atas 100 kHz. Perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan untuk rangkain BPF pertama adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas. Hasil simulasi juga menunjukkan adanya *ripple* pada rentang

frekuensi sekitar 500 kHz – 2 MHz dengan puncak *ripple* -26 dB.

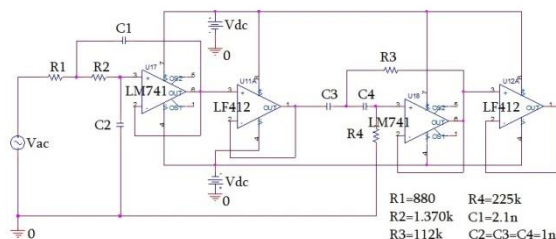


Gambar 7. Rangkaian band pass filter hasil desain dengan empat IC Op-Amp LF412

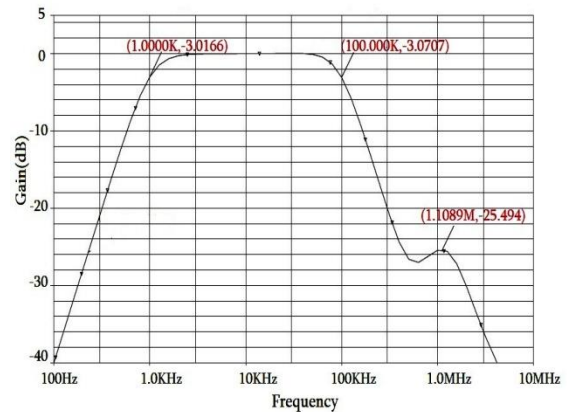


Gambar 8. Respon Frekuensi band pass filter hasil desain dengan empat IC Op-Amp LM741

Uji coba BPF kedua dengan menggunakan IC LF412 sebagai komponen filter dan buffer ampliernya menunjukkan filter memiliki gain -3.0137 dB pada frekuensi *cut-off* bawah 1 kHz dan gain -3.0022 dB pada frekuensi *cut-off* atas 100 kHz. Perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan untuk rangkain BPF kedua adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas. Hasil simulasi juga menunjukkan adanya *ripple* pada rentang frekuensi sekitar 1 MHz – 10 MHz dengan puncak *ripple* -14 dB.

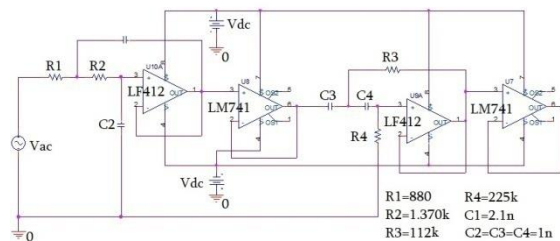


Gambar 9. Rangkaian band pass filter hasil desain dengan kombinasi IC Op-Amp LM741 dan LF412

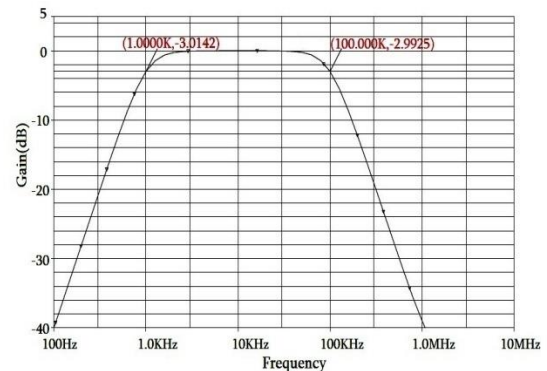


Gambar 10. Respon Frekuensi band pass filter hasil desain dengan kombinasi IC Op-Amp LM741 dan LF412

Uji coba BPF ketiga dengan menggunakan kombinasi IC LM741 sebagai komponen filter dan IC LF412 sebagai buffer ampliernya menunjukkan filter jenis ini memiliki gain -3.0166 dB pada frekuensi *cut-off* bawah 1 kHz dan gain -3.0707 dB pada frekuensi *cut-off* atas 100 KHz. Perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan untuk rangkain BPF ketiga adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas. Hasil simulasi juga menunjukkan adanya *ripple* pada rentang frekuensi sekitar 700 kHz – 7 MHz dengan puncak *ripple* -25 dB.



Gambar 11. Rangkaian band pass filter hasil desain dengan kombinasi IC Op-Amp LF412 dan LM741



Gambar 12. Respon Frekuensi band pass filter hasil desain dengan kombinasi IC Op-Amp LF412 dan LM741

Uji coba BPF keempat dengan menggunakan IC LF412 sebagai komponen filter dan IC LM741 sebagai buffer amplifiernya menunjukkan filter memiliki gain -3.0142 dB pada frekuensi *cut-off* bawah 1 kHz dan gain -2.9925 dB pada frekuensi *cut-off* atas 100 kHz. Perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan untuk rangkain BPF keempat adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas.

Dari hasil uji coba keseluruhan jenis desain rangkaian yang telah dibuat dapat dilihat bahwa semua jenis rangkaian BPF dapat meloloskan sinyal pada rentang frekuensi 1 kHz – 100 kHz. Namun bila ditinjau lebih jauh dari keempat jenis rangkaian BPF yang telah didesain maka rangkaian BPF keempat merupakan rangkaian terbaik yang ditunjukkan tidak munculnya *ripple* dari uji respon frekuensinya dan perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas.

SIMPULAN DAN SARAN

Telah berhasil didesain *Bandpass Filter* (BPF) orde 4, *topologi Sallen-Key* tanpa penguatan (*unity gain*), koefisien *Butterworth* dengan frekuensi 1 kHz - 100 kHz. Berdasarkan hasil uji respon frekuensi secara simulasi pada keempat jenis rangkaian BPF yang telah didesain diperoleh hasil bahwa seluruh rangkaian BPF dapat meloloskan sinyal pada rentang frekuensi 1 kHz – 100 kHz dengan gain rata-rata -3 dB. Perbedaan nilai simulasi dengan nilai yang diharapkan adalah 0% untuk frekuensi *cut-off* bawah dan 0% untuk frekuensi *cut-off* atas pada seluruh rangkain BPF yang didesain. Bila ditinjau lebih jauh maka diperoleh rangkaian BPF keempat dengan kombinasi IC LF412 sebagai komponen filter dan IC LM741 sebagai buffer amplifiernya merupakan rangkaian yang memiliki respon frekuensi terbaik. Hal ini ditunjukkan dengan tidak munculnya *ripple* pada hasil simulasi uji respon frekuensi. Pengujian lebih lanjut dapat dicoba menggunakan IC Op-Amp lainnya dan untuk mengkonfirmasi hasil pengujian desain BPF yang telah dirancang secara simulasi pada penelitian ini dapat dilakukan fabrikasi dan pengujian rangkaian BPF secara langsung.

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kekuatan dan kesempatan yang tak ternilai harganya kepada penulis untuk menyelesaikan penelitian dan tulisan ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdul H.A.Z.Abd., 2014. Design and simulation of 4th order active bandpass filter using multiple feed back and Sallenkey topologies. J. Babylon Univ. Sci. No2 Vol22 2014.
- Babikir Adam, E.E., Sathesh, 2021. Survey on Medical Imaging of Electrical Impedance Tomography (EIT) by Variable Current Pattern Methods. J. ISMAC 3, 82–95. <https://doi.org/10.36548/jismac.2021.2.002>
- Basak, R., Wahid, K.A., 2022. A Rapid, Low-Cost, and High-Precision Multifrequency Electrical Impedance Tomography Data Acquisition System for Plant Phenotyping. Remote Sens. 14, 3214. <https://doi.org/10.3390/rs14133214>
- Bera, T.K., 2018. Applications of Electrical Impedance Tomography (EIT): A Short Review. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 331, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/331/1/012004>
- Gallardo N. V., García H. M., 2022. Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition for HMI Interaction Applications. Journal of Low Power Electronics and Applications. <https://doi.org/10.3390/jlpea12030041>
- Hamilton, S.J., Hauptmann, A., 2018. Deep D-Bar: Real-Time Electrical Impedance Tomography Imaging With Deep Neural Networks. IEEE Trans. Med. Imaging 37, 2367–2377. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2828303>
- Harikumar, R., Prabu, R., Raghavan, S., 2013. Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review 3.
- Ke, X.-Y., Hou, W., Huang, Q., Hou, X., Bao, X.-Y., Kong, W.-X., Li, C.-X., Qiu, Y.-Q., Hu, S.-Y., Dong, L.-H., 2022. Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging. Mil. Med. Res. 9, 10. <https://doi.org/10.1186/s40779-022-00370-7>
- Khalighi M., Vahdat B.V., Mortazavi M., and Mikaeili M., 2014. Design and Implementation of Precise Hardware for Electrical Impedance Tomography (EIT). IJST. Transactions of Electrical Engineering Vol. 38. No. E1, pp 1–20.

- Mancini, R., 2002. Op Amps For Everyone. Texas: Texas Instruments Incorporated.
- Mansouri, S., Alharbi, Y., Haddad, F., Chabcoub, S., Alshrouf, A., Abd-Elghany, A.A., 2021. Electrical Impedance tomography – recent applications and developments. J. Electr. Bioimpedance 12, 50–62. <https://doi.org/10.2478/joeb-2021-0007>
- Nascimento, M.S., Alcalá, G.C., Guzman, A.I.A., Corrêa, L.C., Baggio, D.M., Rossi, F.S., Fascina, L.P., Amato, M.B.P., do Prado, C., 2021. Electrical impedance tomography in pediatric patients with COVID-19, the first reports. BMC Pulm. Med. 21, 357. <https://doi.org/10.1186/s12890-021-01716-y>
- Olalekan, O.B., Toluwani, O.V., 2017. Sallen-Key Topology, MFB and Butterworthy in Bandpass Design for Audio Circuit Design.
- Pactitis, S.A, 2007. ACTIVE FILTERS Theory and Design. CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-4200-5477-4.
- Padilha Leitzke, J., Zangl, H., 2020. A Review on Electrical Impedance Tomography Spectroscopy. Sensors 20, 5160. <https://doi.org/10.3390/s20185160>
- Sarode V., Chimurkar P.M., and Cheeran A.N., 2012. Electrical Impedance Tomography using EIDORS in a Closed Phantom. International Journal of Computer Applications 48– No.19.
- Sebu, C., 2017. Electrical Impedance Mammography: the key to low-cost, portable and non-invasive breast cancer screening? Xjenza Online 154–157. <https://doi.org/10.7423/XJENZA.2017.2.09>
- Singh G., Anand S., Lall B., Srivastava A., and Singh V., 2012. Development of a Microcontroller based Electrical Impedance Tomography System. 2015 Long Island Systems, Applications and Technology.IEEE.
- Teschner E., Imhoff M., Leonhardt S., 2013. Electrical Impedance Tomography:The realization of regional ventilation monitoring 2nd edition. Drager.Technology for life.
- Winder, S., 2002. Analog and Digital Filter Design 2nd Edition. . Newnes. ISBN: 0-7506-7547-0.